

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR
ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE, DE LA SANTE ET DE
L'ENVIRONNEMENT
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

ANNEE : 2015 N° d'ordre : 194



THESE DE DOCTORAT
Spécialité : Ecologie et Gestion des Ecosystèmes

Présentée par :

Lamine DIAME

Relations entre le fonctionnement des agroécosystèmes à base de fruitiers et les fourmis (Hymenoptera : Formicidae). Impacts sur le développement des mouches des fruits (Diptera : Tephritidae)

Soutenue le 12 février 2016 devant le jury composé de :

M. Bhen Sikina TOGUEBAYE	Professeur, UCAD, Sénégal	Président du jury
M. Jean-François VAYSSIERES	Directeur de Recherches, CIRAD/IITA, Bénin	Rapporteur
M. Emile Victor COLY	Directeur de Recherches, DPV, Sénégal	Rapporteur
Mme. Constance AGBOGBA	Maître de Conférences, UCAD, Sénégal	Rapporteur
M. Kandioura NOBA	Professeur, UCAD, Sénégal	Examineur
M. Jean-Yves REY	Chercheur, CIRAD/ISRA, Sénégal	Examineur
M. Karamoko DIARRA	Professeur, UCAD, Sénégal	Directeur de Thèse

Co-encadrants : Dr Rumsaïs BLATRIX, CEFE/CNRS, France; Dr Isabelle GRECHI, CIRAD, France;
Dr Jean-Yves REY, CIRAD, France

*A tous ceux qui ont, de près ou de loin contribué
à la réalisation de ce travail.
Je vous remercie tous.*

Remerciements

Cette œuvre est le résultat d'un travail réalisé au Laboratoire « Equipe Production et Protection Intégrées en Agro-écosystème Horticole » (2PIA) du Département de Biologie Animale de l'Université de Dakar (SENEGAL) sous la direction du Professeur Karamoko DIARRA, au Laboratoire d'Entomologie du Centre pour le Développement de l'Horticulture (CDH/SENEGAL), au Laboratoire Fonctionnement Agro-écologique et Performances des cultures horticoles du CIRAD (Montpellier) sous la direction du Docteur Isabelle GRECHI et au Laboratoire Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE/Montpellier) sous la direction du Docteur Rumsaïs BLATRIX. La coordination des différentes activités de terrain était sous la responsabilité du Docteur Jean-Yves REY, initiateur de ce projet d'étude. Le travail a bénéficié du soutien financier du Programme de Développement des Marchés Agricoles du Sénégal (PDMAS) et d'un appui du Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) à travers le programme « Actions incitatives » de soutien aux doctorants du Sud.

Je rends d'abord grâce à Dieu de m'avoir donné la santé et la possibilité de pouvoir réaliser ce travail.

Je tiens à remercier très sincèrement mes encadrants: le Professeur Karamoko DIARRA, les Docteurs Jean-Yves REY, Isabelle GRECHI, Jean-François VAYSSIERES et Rumsaïs BLATRIX pour avoir accepté de former le comité de cette thèse, pour m'avoir soutenu et encouragé, mais aussi pour la confiance qu'ils ont portée en moi tout au long de cette étude. Un grand merci particulièrement au Dr Jean-Yves REY pour m'avoir donné l'opportunité de faire cette thèse.

Je voudrais manifester particulièrement ma profonde gratitude au Dr Isabelle GRECHI (CIRAD, Ile de La Réunion) qui a suivi et encadré la partie « analyses statistiques » avec attention et dynamisme et qui a énormément suivi les corrections des articles rédigés au cours de cette thèse ; au Dr Jean-François VAYSSIERES (CIRAD/IITA-Bénin) pour la disponibilité, les conseils et les orientations scientifiques qu'il m'a apportés durant cette thèse; au Dr Rumsaïs BLATRIX (CNRS/CEFE, Montpellier) pour avoir accepté de m'accueillir dans son laboratoire sans me connaître au préalable, pour m'avoir aidé à séparer mes morphotypes de fourmis et pour m'avoir initié à des techniques d'analyses écologiques relatives à ma thématique de recherche mais aussi pour sa pleine participation à la rédaction et aux corrections des articles. Je salue sa disponibilité, ses précieux conseils et son assistance sans faille à toutes les initiatives que je prenais.

A tous ces encadrants, un grand merci pour leur sympathie, leur aide sans faille à intervenir sur mes préoccupations scientifiques et tous les efforts qu'ils ont fournis pour la finalisation de ce travail.

Un grand merci au Dr Hubert DE BON (CIRAD, Montpellier) pour ses assistances administratives et pédagogiques mais aussi et surtout les relations scientifiques et professionnelles qu'il a su créer entre d'autres chercheurs et moi.

Je remercie également le Dr Brian TAYLOR, d'abord pour l'identification de mes espèces de fourmis, son aide sur la documentation liée aux fourmis africaines et pour la révision de l'anglais de mes articles.

Mes remerciements vont à l'endroit du Dr Anaïs CHAILLEUX (CIRAD/Montpellier) pour ses conseils scientifiques et ses propositions de raisonnement dans mes articles et pour avoir accepté de relire ma thèse. Merci également pour les démarches entreprises auprès des traducteurs et éditeurs.

Merci aux Docteurs Emile Victor COLY et Dieynaba Sall SY respectivement ex et actuel chefs du CDH, pour avoir accepté de m'accueillir dans leur laboratoire d'entomologie et dans leurs bureaux.

Je souhaite aussi remercier toute l'équipe « Arboriculture fruitière » du CDH particulièrement les collègues doctorants Cheikh Amet Bassirou SANE, Paterné DIATTA, Ardachir YASMINE et Jeanne DIATTA (CERAAS-Thiès), pour leur sympathie quotidienne et pour avoir contribué au bon déroulement à des activités de ma thèse.

Un grand merci aux cartographes Céraphin DOREGO (CNRA, Bambey), Ibrahima THIAW (LERG-ESP) et Justin Fagnombo DJAGBA (AfricaRice, Bénin), aux statisticiens Ahmadou DICKO (UCAD) et Diariatou SAMBAKHE (CERAAS-Thiès), au documentaliste Annie BOYER (CIRAD-Dist) pour toute l'aide qu'ils m'ont apportée.

Je remercie mes camarades thésards Babacar LABOU, Mamadou DIATTE et Aguibou DIALLO pour leur collaboration et les échanges fructueux que nous avons partagés. Un grand merci aux techniciens de laboratoires, aux propriétaires de vergers pour leur aide, leur ouverture et leur disponibilité.

Je tiens à remercier du fond du coeur à ma bien aimée Awa DIENG pour sa loyauté, sa générosité et sa patience.

Un grand merci à tous mes amis et aux personnes qui me sont chères pour leurs constants encouragements ; à ma famille qui m'a toujours soutenu et qui a supporté mes longues périodes d'absence, particulièrement mon père et ma mère. Je remercie mes frères et sœurs. Je remercie également ma famille d'accueil à Thiès (famille BADJI)

pour sa générosité et sa profonde sympathie envers ma personne. Je remercie aussi très fortement, pour leur soutien, des personnes qui me sont chères: Moustapha NDIAYE, Fallilou DIOP, Abib NIANE, Cheikh FAYE, Alassane NDIAYE, Mamadou NONG, Karamo SARR, Binetou THIAM, Fatou Ismaïla SARR, Seynabou COLY, Mor Talla NDONG, Omar DIONE, Pape Cheikh SARR... Je remercie les étudiants de Fimela à travers leur amicale qui a joué un rôle important dans ma formation et carrière d'études. Un grand merci à mon ami et frère Gilbert DOGUE.

Je remercie les bonnes personnes que j'ai rencontrées à Montpellier et qui m'ont apporté un soutien énorme durant mes séjours. Je veux nommer Fall CISS et sa femme Leslie VINCENT, le Dr Laurence ARVANITAKIS et sa famille, ainsi que le Dr Dominique BORDAT. Je veux remercier Danielle COSTEPLANE et son époux Bernard, le couple Françoise et Marc BASOIN pour m'avoir accueilli respectivement à Marmande et à Bordeaux.

Mention spéciale à mes camarades de classe au BSI (British Senegalese Institute): Khady DIOUF, Mame Diarra Bousso MBACKE, Djibril DIOUF, Mohamed BA, Adama SOW, Kevin Iyan Laity FALL. Merci à mes enseignants en Anglais: Amadine NGOM et Amadou Kabir NDIAYE pour leurs conseils et encouragements. Merci à mes amis du club Anglais notamment Abdoul TAMBADOU et Mohamed ASSEGBA pour leur sympathie sans faille.

Je remercie également la famille BARRY à Thiès. Un grand merci également à Khatary MBAYE et sa famille.

Les personnes auxquelles je n'ai pas pu citer les noms retiendront seulement que je ne dispose pas assez de place pour les remercier assez.

A tous ceux qui ont de près ou de loin contribué à la réalisation de ce travail, je vous remercie sincèrement.

Sommaire

Remerciements.....	ii
Liste des annexes.....	x
Acronymes	xii
Liste des tableaux	xii
Liste des figures	xiii
Liste des photos	xiv
Résumé	xvi
Abstract	xvii
Introduction générale.....	1
<i>CHAPITRE 1 : Présentation du contexte, du système d'étude et du travail de thèse</i>	<i>5</i>
I. CONTEXTE DE L'ETUDE	6
I.1 L'importance de la production fruitière dans les Niayes et le plateau de Thiès.....	6
I.2 Les variations dans les caractéristiques des agroécosystèmes à base de fruitiers	6
I.2.1 Les caractéristiques et les modes de fonctionnement des agroécosystèmes de fruitiers	7
I.2.2 Description des types de verger	7
I.3 L'espèce <i>Bactrocera dorsalis</i> et ses incidences économiques.....	11
I.3.1 Présentation de <i>Bactrocera dorsalis</i>	11
I.3.1.1 Systématique	11
I.3.1.2 Origine et répartition géographique	12
I.3.2 Incidences économiques de <i>Bactrocera dorsalis</i> au Sénégal	13
I.4 La fourmi <i>Oecophylla longinoda</i>	14
I.5 Conclusion partielle: émergence de deux questions de recherche.....	15
II. LE SYSTEME D'ETUDE	16
II.1 Présentation de la zone d'étude.....	16
II.1.1 Localisation des agroécosystèmes	16
II.1.2 Le milieu physique.....	17
II.1.2.1 Climatologie	17
II.1.2.2 Pédologie.....	17
II.2 Espèces fruitières cultivées dans les vergers.....	17
III. PRESENTATION DU TRAVAIL DE THESE	19
III.1 Matériel et méthodes	19

III.1.1 Matériel	19
III.1.2 Méthodes	19
III.1.2.1 Expérimentations	19
III.1.2.1.1 Echantillonnage des fourmis dans les vergers	19
III.1.2.1.2 Suivi des infestations des fruits sur manguiers « avec colonie » et sur manguiers « sans colonie » de fourmis oecophylles.....	20
III.1.2.1.3 Suivi de l'abondance de la fourmi <i>Oecophylla longinoda</i> dans les vergers	21
III.1.2.1.4 Suivi de l'abondance de la mouche des fruits <i>Bactrocera dorsalis</i> dans les vergers	21
III.1.2.2 Traitement et analyses des données	22
III.1.2.2.1 Logiciels utilisés	22
III.1.2.2.2 Tests statistiques et analyses écologiques.....	22
III.2 Conclusion du chapitre 1.....	24
CHAPITRE 2 : Bioécologie et rôles fonctionnels des fourmis dans les agroécosystèmes.....	26
« Synthèse bibliographique »	26
Introduction	27
I. Généralités sur la bio-écologie des fourmis.....	28
II. Les fourmis: agents de lutte biologique et éléments fonctionnels importants dans les agroécosystèmes fruitiers.....	29
II.1 Les fourmis: agents de contrôle naturels.....	29
II.1.1 Généralités sur l'activité protectrice des fourmis vis-à-vis des plantes	29
II.1.2 Le genre <i>Oecophylla</i> : un agent de lutte biologique efficace en horticulture	30
II.1.2.1 Ecologie du genre <i>Oecophylla</i> et potentiel de régulation des insectes nuisibles dans les vergers	30
II.1.2.2 Importance et efficacité d' <i>O. smaragdina</i> et d' <i>O. longinoda</i> en tant qu'agents de lutte biologique en vergers et en plantations	32
<i>O. smaragdina</i> en Asie tropicale et en Australie.....	32
<i>O. longinoda</i> en Afrique sub-saharienne.....	32
Mécanismes mis en œuvre par <i>O. longinoda</i> pour la lutte biologique contre les bioagresseurs	35
II.1.2.3 Problématiques pour l'adoption du genre <i>Oecophylla</i> par les producteurs....	36
Interactions avec les homoptères Coccidae	36
Les piqûres.....	37
II.2 <i>Oecophylla</i> spp. et réseaux trophiques au sein des agroécosystèmes.....	37

II.2.1 Favoriser les fourmis oecophylles dans les agroécosystèmes.....	37
II.2.2 Interactions avec les autres ennemis naturels	39
II.2.3 Interactions avec les pollinisateurs	40
II.3 Autres rôles fonctionnels des fourmis dans les agroécosystèmes	41
II.3.1 Agents pollinisateurs.....	41
II.3.2 Agents bioturbateurs ou « ingénieurs des écosystèmes » ?	42
II.3.3 Agents contribuant à la conservation de la biodiversité animale et végétale dans les écosystèmes.....	43
III. Utilisation des fourmis comme bio-indicateurs	44
IV. Conclusion du chapitre 2	46
<hr/>	
CHAPITRE 3 : Relations entre les caractéristiques du verger, les fourmis et les mouches des fruits.....	47
<hr/>	
I. LES INTERACTIONS ENTRE LES CARACTERISTIQUES DU VERGER, LA FOURMI <i>Oecophylla longinoda</i> ET LA MOUCHE DES FRUITS <i>Bactrocera dorsalis</i> ..	48
I.1 Résumé	48
I.2 Abstract	49
I.3 Introduction	50
I.4 <i>Material and Methods</i>	53
I.4.1 Study area and orchard sampling	53
I.4.2 Data collection	55
I.4.2.1 Fruit infestation monitoring on mango trees with and without weaver ant colonies.....	55
I.4.2.2 Monitoring of weaver ant and fly abundance	56
I.4.2.3 Statistical analysis.....	56
I.5 <i>Results</i>	57
I.5.1 Effect of <i>Oecophylla longinoda</i> presence on mango infestation by <i>Bactrocera dorsalis</i>	57
I.5.2 Relationships between orchard design and management practices and weaver ant and fruit fly abundance in orchards.....	59
I.6 <i>Discussion and conclusion</i>	62
II. LISTE DE LA MYRMECOFAUNE DU SENEGAL ET BIODIVERSITE DES FOURMIS ASSOCIEE AUX AGROECOSYSTEMES FRUITIERS	66
II.1 Résumé	66
II.2 Abstract	66
II.3 Introduction	67
II.4 <i>Methods</i>	69

II.5 Results	69
II.6 Discussion	75
III. RELATIONS ENTRE LES CARACTERISTIQUES DU VERGER ET LES COMMUNAUTÉS DE FOURMIS.....	78
III.1 Résumé	78
III.2 Abstract	79
III.3 Introduction	79
III.4 Materials and methods	81
III.4.1 Study area.....	81
III.4.2 Orchard sample and characterisation of orchard types based on design and management practices	82
III.4.3 Ant sampling	85
III.4.4 Relations between orchard characteristics and ant diversity and richness.....	86
III.4.5 Characterization of orchard types based on ant communities.....	86
III.4.6 Relationships between orchard characteristics and ant community composition..	87
III.5 Results	87
III.5.1 Species richness and composition of ant samples.....	87
III.5.2 Relations between orchard characteristics and ant diversity and richness.....	89
III.5.3 Relations between orchard characteristics and ant community composition	91
III.5.4 Discussion and conclusion	97
IV. CONCLUSION DU CHAPITRE 3	101
CHAPITRE 4 : Discussions, Conclusions générales et Perspectives	103
IV.1 La lutte biologique par <i>O. longinoda</i>: un intérêt évident contre les dégâts de mouches des fruits mais qu'en est-il de la pollinisation du manguiier ?	104
IV.2 La biodiversité des fourmis dans les Niayes et le plateau de Thiès: potentialités fonctionnelles et intérêt majeur pour la lutte biologique	105
IV.3 Les rôles de la conception et des pratiques d'entretien des vergers sur la structuration des communautés de fourmis	107
IV.4 La gestion agroécologique des vergers Sénégalais: une possibilité existe-t-elle avec les fourmis parmi les éléments fonctionnels ?	108
Références bibliographiques	110
ANNEXES	I
ANNEXE 1: Article publié dans Fruits, 2013, vol. 68, 1-20: Mango-based orchards in Senegal: diversity of design and management patterns Réf: Fruits 68(6): 446-466 (2013).. II	
ANNEXE 2: Article publié par African Entomology, 2015, vol 23 (2), 294-305: Influence of <i>Oecophylla longinoda</i> Latreille, 1802 (Hymenoptera: Formicidae) on mango infestation by	

Bactrocera dorsalis (Hendel) (Diptera: Tephritidae) in relation to Senegalese orchard design and management practices.....	III
ANNEXE 3: Article publié par Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, vol. 212, 94-105: http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.004 : Relations between the design and management of Senegalese orchards and ant diversity and community composition	IV
ANNEXE 4: Article soumis dans Fruits: Ants: biological control agents and major functional elements in fruit agro-ecosystems	V
ANNEXE 5 : Fiche de suivi d'abondance des fourmis oecophylles dans 15 vergers et pendant quatre mois (deux en saison sèche et deux en saison pluvieuse). Le suivi se faisait une fois tous les 15 jours	VI
ANNEXE 6 : Fiche de suivi d'abondance des mouches des fruits (Bactrocera dorsalis) dans 15 vergers et pendant quatre mois (deux en saison sèche et deux en saison pluvieuse)	VII
ANNEXE 7 : Fiches de recueil de données sur les arbres fruitiers et sur les pratiques culturelles du verger (groupes 'orchard design', 'orchard vegetative state' et 'orchard management')	VIII
ANNEXE 8 : Fiche d'enquêtes et tableau de recueil de données sur les pratiques culturelles d'entretien des vergers	IX
ANNEXE 9 : Pourcentage de vergers dans lesquels chaque espèce de fourmi est présente. Pour les noms complets des espèces de fourmis, cf Taleau 7, chapitre 3	XVI

Liste des annexes

ANNEXE 1: Article publié dans *Fruits*, 2013, vol. 68, 1-20: Mango-based orchards in Senegal: diversity of design and management patterns.

Auteurs: Isabelle GRECHI, Cheikh Amet Bassirou SANE, **Lamine DIAME**, DE BON Hubert, A. BENNEVEAU, Thierry MICHELS, Virginie HUGUENIN, Eric MALEZIEUX, Karamoko DIARRA & Jean-Yves REY.

ANNEXE 2: Article publié par *African Entomology*, 2015, vol 23 (2), 294-305: Influence of *Oecophylla longinida* Latreille, 1802 (Hymenoptera: Formicidae) on mango infestation by *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) in relation to Senegalese orchard design and management practices.

Auteurs: **Lamine DIAME**, Isabelle GRECHI, Jean-Yves REY, Cheikh Amet Bassirou SANE, Paterne DIATTA, Jean-François VAYSSIERES, Ardachir YASMINE, Hubert de BON & Karamoko DIARRA.

ANNEXE 3: Article publié par *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, vol. 212, 94-105: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.004>: Relations between the design and management of Senegalese orchards and ant diversity and community composition.

Auteurs: **Lamine DIAME**, Rumsaïs BLATRIX, Isabelle GRECHI, Jean-Yves REY, Cheikh Amet Bassirou SANE, Jean-François VAYSSIERES, Hubert de BON & Karamoko DIARRA.

ANNEXE 4: Article soumis dans *Fruits*: Ants: biological control agents and major functional elements in fruit agroecosystems.

Auteurs: **Lamine DIAME**, Jean-Yves REY, Jean-François VAYSSIERES, Isabelle GRECHI, Anaïs CHAILLEUX, Karamoko DIARRA.

ANNEXE 5: Fiche de suivi des abondances de fourmis oecophylles dans 15 vergers et pendant les quatre mois (deux en saison sèche et deux en saison pluvieuse).

ANNEXE 6: Fiche de suivi des abondances de mouches des fruits dans 15 vergers et pendant les quatre mois (deux en saison sèche et deux en saison pluvieuse).

ANNEXE 7: Fiches de recueil de données sur les arbres fruitiers et sur les pratiques culturelles des vergers (groupes ‘orchard design’, ‘orchard vegetative state’ et ‘orchard management’).

ANNEXE 8: Fiche d’enquêtes et tableau de recueil de données sur les pratiques culturelles d’entretien des vergers.

ANNEXE 9: Figure montrant le pourcentage de vergers dans lesquels chacune des espèces de fourmi est présente.

Acronymes

AHC: Agglomerative Hierarchical Clustering

CDH: Centre pour le Développement de l'Horticulture

CEFE: Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive

CERAAS: Centre d'Etudes Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse

CIRAD: Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique

EPPO: European and Mediterranean Plant Protection Organisation

FAO/WHO: Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation/World Health Organization

GLM: Generalized Linear Model

IITA: International Institute of Tropical Agriculture

IPM: Integrated Pest Management

MFA: Multiple Factor Analysis

MFAH: Hierarchical Multiple Factor Analysis

MRL: Maximum Residue Limit

PDMAS: Programme de Développement des Marchés Agricoles du Sénégal

RDA: Redundancy Analysis

Liste des tableaux

Tableau 1: Nombre d'arbres de la base de données par espèce fruitière recensée dans les agro-écosystèmes étudiés..... **18**

Tableau 2: Pays africains où la présence d'*Oecophylla longinoda* a été signalée **31**

Tableau 3: Exemples de contrôle biologique effectué par *Oecophylla* spp. contre des insectes ravageurs de cultures **33**

Table 4: Locations of the 15 orchards studied for monitoring *Bactrocera dorsalis* and *Oecophylla longinoda* abundance in the Niayes area and the Thiès Plateau, in Senegal. **55**

Table 5: Checklist of the ant species of Senegal. The list is arranged alphabetically by subfamily, genus and species. Names in bold refer to species recorded in Senegal for the first

time. Species with an asterisk have been recorded in our survey of orchard agroecosystems in the “Niayes” and “Plateau de Thiès” **70**

Table 6: List and definition of all the variables of the ‘orchard design’, ‘orchard management’ and ‘vegetation state’ groups used to describe the orchards. The asterisk indicates the variables used in the ant diversity and richness and RDA analyses. For details on variables, see Grechi et al., 2013 **83**

Table 7: List of ant species collected in the 49 orchards in the dry and rainy periods in 2012. Species code is the code for the morphotypes used in statistical analyses..... **88**

Liste des figures

Figure 1: Positionnement des sites d’étude au niveau des Niayes et du plateau de Thiès (Sénégal) **16**

Figure 2: Map of the study area in the Niayes and Thiès plateau zones, in Senegal. The number of orchards in each zone and per orchard type is indicated between brackets. Orchard type: (1) “No-input mango diversified orchards”, (3) “Medium-input citrus-predominant orchards” and (4) “Medium-input large mango- or citrus predominant orchards” **53**

Figure 3: Mean (\pm SD; n=4) total number of *Bactrocera dorsalis* pupae collected from 25 mangoes per sampling period according to the presence (■) or absence (□) of an ant colony on trees. Asterisks indicate a significant difference between ant treatments (* $P < 0.1$, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$)..... **58**

Figure 4: Mean (\pm SD; n = 4) infestation rate of mangoes per sampling period according to the presence (■) or absence (□) of ant colonies on trees. Asterisks indicate a significant difference between ant treatments (* $P < 0.1$, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$) **59**

Figure 5: Relation between *Oecophylla longinoda* and *Bactrocera dorsalis* abundance in the fifteen orchards monitored in the dry season (A) and the rainy season (B). **60**

Figure 6: Mean (\pm SD; n = 5) ant abundance depending on orchard type during the humid (■) and dry (□) seasons. Orchard types with different letters are significantly different (Multiple comparison test after Kruskal-Wallis test; $P < 0.05$). **61**

Figure 7: Mean (\pm SD; n = 5) fly abundance depending on orchard type during the humid (■) and dry (□) seasons. Orchard types with the same letters are not significantly different (Multiple comparison test after Kruskal-Wallis test; $P < 0.05$). **62**

Figure 8: Maps presenting Senegal in West Africa, the “Niayes” and “Plateau de Thiès” (two agroecosystems zones in Senegal where fresh collection of ants was carried out), and the

averages of annual rainfall and annual temperatures in the country (source: Atlas Jeune Afrique, 2000)) **68**

Figure 9: Map of the study area in the Niayes and Plateau de Thiès regions, Senegal **82**

Figure 10: Ant richness (A) and ant diversity (B) in the four orchard types: (1) “No-input mango diversified orchards”, (2) “Low-input mango orchards”, (3) “Medium-input citrus-predominant orchards” and (4) “Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards”. Orchard types with different letters are significantly different (Multiple comparison test after Kruskal-Wallis test; $P < 0.05$) **90**

Figure 11: Variation in ant richness and ant diversity depending on the main crop in the type 3 and type 4 orchards located in the localities of Ndoyenne and Notto. Citrus orchards were continuously irrigated and Mango orchards were only irrigated for five months (January to May) **90**

Figure 12: Relations between ant richness, ant diversity and two variables relative to orchard design (tree richness) and management practices (soil care: 0 = no soil care, 1 = shallow tillage and/or mechanical weeding of soil; pesticide: 0 = no pesticide, 1 = 1 to 2 applications per year, 2 = 3 to 5 applications per year, 3 = more than 5 applications per year) **91**

Figure 13: Dendrogram clustering the Senegalese orchards in four groups (A, B, C and D) according to resemblances in their ant community composition. The orchard label is composed of letters indicating the localities in which the orchard is located (T=Thiès, P=Pout, N=Notto, Nd=Ndoyenne), followed by a number standing for the orchard type according to the typology based on orchard design and management practices: (1) ‘No-input mango diversified orchards’, (2) ‘Low-input mango orchards’, (3) ‘Medium-input citrus-predominant orchards’ and (4) ‘Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards’ **92**

Figure 14: Abundances of ant species in the four orchard groups (A), (B), (C) and (D) that were defined according to resemblances in their ant community composition. Values are the % of pitfalls in which a species was present out of the total number of pitfalls collected in all the orchards of the groups during the dry and rainy periods (i.e., 880, 440, 320 and 320 pitfalls in groups (A), (B), (C) and (D) respectively). For full names of ant species see Table 7. **93**

Figure 15: Correlation plot of orchard design, management and vegetation state variables (arrows) and either orchard types (numbers in grey) (A) or ant morphotypes (grey) (B) with respect to the first two Redundancy Analysis (RDA) axes. For clarity, ant morphotypes with coordinates < 0.1 on axes 1 and 2 have been removed. **95**

Liste des photos

Photo 1 : Exemple de verger de type 1	8
Photo 2 : Exemple de verger de type 2	9
Photo 3 : Exemple de verger de type 3	10
Photo 4 : Exemple de verger de type 4	11
Photo 5 : Femelle de <i>Bactrocera dorsalis</i> déposant ses œufs sur une mangue	13
Photo 6 : Dispositif d'un piège à fosse ou pitfall trap	2015
Photo 7 : Nid de fourmis oecophylles (<i>O. longinoda</i>) sur manguier	20
Photo 8 : Dispositif d'un piège tephri trap	22

Résumé

Le fonctionnement des vergers lié à leur conception et aux pratiques d'entretien des cultures est susceptible d'avoir une influence sur les niveaux de populations des fourmis oecophylles et par conséquent sur leur capacité à exercer une lutte biologique vis-à-vis de *Bactrocera dorsalis*, le principal ravageur des fruits au Sénégal. Dans les Niayes et le plateau de Thiès où le potentiel de la fourmi *Oecophylla longinoda* à limiter les infestations de mangues par *B. dorsalis* n'avait jamais été démontré, quatre types de vergers ont été identifiés. Le type 1 correspond aux « vergers de manguiers diversifiés sans entretien » ; le type 2, aux « vergers de manguiers diversifiés faiblement entretenus » ; le type 3, aux « vergers mixtes à dominance d'agrumes avec un entretien intermédiaire » ; et le type 4 à de « grands vergers homogènes d'agrumes ou de manguiers avec un entretien intermédiaire ». L'objectif de ce travail est i) d'évaluer l'impact de la fourmi *O. longinoda* sur les infestations des mangues par *B. dorsalis*, ii) d'étudier les variations des abondances de ces deux espèces en fonction du type de verger et iii) de vérifier si la biodiversité des fourmis peut servir de bioindicateur du type de gestion des vergers. La biodiversité des fourmis et les niveaux de populations de la fourmi *O. longinoda* et de la mouche des fruits *B. dorsalis* ont été étudiés dans ces vergers. Nous avons montré que la fourmi *O. longinoda* limite les infestations des mangues par *B. dorsalis*. Les niveaux de populations d'*O. longinoda* et de *B. dorsalis* varient en fonction du type de verger. La diversité, la richesse spécifique et la composition des communautés de fourmis varient également en fonction du type de verger. Les vergers de type 4 ont les plus faibles diversités et richesses en espèces de fourmis. Ils enregistrent les plus bas niveaux de populations d'*O. longinoda* et les plus hauts niveaux de populations de *B. dorsalis*. Les vergers de type 3, avec une diversité végétale plus importante, enregistrent les plus fortes diversités et richesses en fourmis et hébergent plus de populations d'*O. longinoda* parcontre moins de populations de *B. dorsalis*. Une très forte association entre la fourmi *Monomorium salomonis* et les vergers de type 4 est observée. La fourmi *Paltothyreus tarsatus* semble indicatrice des vergers de type 1 et type 2.

Mots clés : agroécosystèmes fruitiers, biodiversité fourmis, *Oecophylla longinoda*, *Bactrocera dorsalis*, lutte biologique, type de verger, Sénégal.

Abstract

The functioning of orchards linked to their design and the management of crops is likely to have an impact on population levels of weaver ants *Oecophylla* and therefore on their ability to exert biological control on *Bactrocera dorsalis*, the main pest of fruits in Senegal. In the Niayes and the Plateau de Thiès where the potential of the *Oecophylla longinoda* ant to limit mango infestations by *B. dorsalis* had never been studied, four types of orchards have been identified. The type 1 corresponds to “No-input mango diversified orchards”; the type 2, to “Low-input mango diversified orchard”; the type 3, to “Medium-input citrus-predominant orchards”; and the type 4 to “Medium-input large mango- or citrus predominant orchards”. The objective of this work is i) to evaluate the impact of the *O. longinoda* ant on mango infestations by the *B. dorsalis* fly, ii) to study the variations of the abundances of these two species based on the type of design and management of the orchard, iii) and to ascertain whether biodiversity of ants can be used as bio-indicator of the type of design and management of the orchard. The biodiversity of ants and the population levels of the ant *O. longinoda* and the fruit fly *B. dorsalis* have been studied in those orchards. We showed that the ant *O. longinoda* limits mango infestations by *B. dorsalis*. The population levels of these two species vary depending on the type of design and management of the orchard. Diversity, species richness and community composition of ants also depend on the type of design and management of the orchard. The orchards of type 4 have the lowest ant diversity and ant richness. They recorded the lowest levels of *O. longinoda* ant populations and the highest levels of *B. dorsalis* fly populations. The orchards of type 3 recorded the highest ant diversity and ant richness and hosted more *O. longinoda* populations and few of *B. dorsalis* fly populations. A strong association between *Monomorium salomonis* ant one and type 4 orchards is observed. The ant *Palthotyreus tarsatus* seemed to be a good bio-indicator of orchards not disturbed by intensive human farming practices like orchards of type 1 and type 2.

Keywords: fruit agricultural ecosystem, ant biodiversity, *Oecophylla longinoda*, *Bactrocera dorsalis*, biological control, orchard type, Senegal

Introduction générale

Au fur et à mesure que l'Homme modifie son environnement, il impacte la composante biologique de cet environnement par ces changements. Une des premières causes de perte de biodiversité est la destruction et la modification des habitats naturels par les activités humaines (Matson et *al.*, 1997 ; Altieri, 1999 ; Benton et *al.*, 2003). L'écologie, branche de la biologie, étudie les relations de dépendance et les interrelations des êtres vivants entre eux et avec leur milieu de vie. Son champ d'intervention intéresse divers types d'écosystèmes aussi bien marins que terrestres. Les modifications que l'espèce humaine apporte aux écosystèmes naturels, qu'elles soient d'ordre biologique ou physico-chimique, ont nécessairement des effets non seulement sur le milieu visé, mais également sur les systèmes adjacents et, par rétroaction, sur elle-même. Toutefois, dans tout écosystème naturel ou modifié impliquant une compétition pour les ressources, le maintien d'un système écologiquement stable est un élément important. Cette approche de système écologiquement stable est apparue depuis l'émergence des questions de durabilité.

Les agroécosystèmes fruitiers dans les régions de Dakar et Thiès (Sénégal) forment de grands ensembles avec de grandes variations des caractéristiques physiques (sol, microclimat etc.) à de faibles distances. Une très grande diversité des motivations des producteurs, de la biodiversité naturelle et cultivée, des modes de conduite et des niveaux d'intensification est également notée dans ces agroécosystèmes.

En 2011, un bilan sur les espèces invasives, de mouches des fruits (2 espèces) ainsi que sur les espèces natives (21 espèces) présentes au Sénégal avait été réalisé (Vayssières et *al.* 2011). Parmi les espèces invasives *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (syn. *Bactrocera invadens* Tsuruta & White) (Diptera: Tephritidae) était et reste un ravageur de très grande importance économique. Cette espèce d'origine asiatique, arrivée courant 2004 au Sénégal, avait été signalée dès la fin 2004 dans les Niayes (Vayssières, 2004). Cette espèce invasive bien installée provoque d'énormes pertes sur la production fruitière dont les mangues sont les plus affectées. La gestion de ce bioagresseur dans les agroécosystèmes à base de fruitiers au Sénégal est difficile et les résultats d'enquêtes sur sa gestion ne permettent pas de porter un choix clair sur une méthode de lutte optimale et efficace. L'application de pesticides chimiques est l'une des méthodes pour lutter contre ces ravageurs alors qu'elle est inadéquate pour plusieurs raisons : (i) un accès aux produits qui est limité, (ii) les produits sont appliqués à la mauvaise période et avec des doses non rationnelles (mauvaise maîtrise des techniques de leur utilisation par les producteurs), (iii)

les précautions d'utilisation des pesticides de synthèse ne sont pas toujours respectées, (iv) ils ne sont pas efficaces sur le bioagresseur visé car il n'y a pas de produit homologué contre les Tephritidae en dehors du GF-120, (v) impacts potentiellement négatifs sur les auxiliaires et la santé des utilisateurs.

Les agroécosystèmes peuvent être regroupés en trois sous-groupes:

- monoculture moderne (plantations monospécifiques),
- polyculture (arboriculture fruitière, maraîchage et élevage) et
- culture mixte (mélange d'espèces et de variétés fruitières) souvent traditionnel.

Le constat global est que l'espèce fruitière d'intérêt commercial est le seul souci de l'agriculteur car elle est considérée comme le seul élément important du système d'exploitation. Les principales actions sont plus orientées sur des itinéraires techniques visant à produire massivement sans souci particulier à l'endroit des autres composantes biotiques du système comme la diversité animale et/ou végétale. La question du pilotage des fonctionnements des vergers a conduit à l'émergence de nouveaux défis pour la recherche qui doit éclairer les relations entre les pratiques culturales dans les systèmes de productions fruitières et les composantes biotiques dans ces systèmes. Du point de vue de la gestion de ces vergers, les deux approches agronomique et écologique ne sont pas souvent articulées : la démarche agronomique constitue la plus évidente dans les systèmes anthropisés tandis que la démarche écologique est surtout retenue pour les systèmes naturels. Pourtant les analyses par approche des modèles écologiques (inventaires d'espèces, distributions spatiales des espèces, analyses de redondance, mesures d'impacts sur la biodiversité etc.) sont des outils pertinents pour la compréhension du fonctionnement des systèmes anthropisés où les interactions entre les composantes biotiques des systèmes sont à nouveau considérées avec intérêt.

Le recours à l'entomologie pour mieux appréhender l'état d'équilibre du fonctionnement d'un écosystème est possible et il a pendant longtemps été privilégié (Braet, 2004 ; Andersen *et al.* 2004 ; Jennings & Pocock, 2009 ; Babin-Fenke & Anand, 2010). Parmi les arthropodes, le taxon des fourmis constitue l'outil le plus pertinent pour un diagnostic de l'état du milieu (King *et al.* 1998; Majer *et al.* 2007). Les fourmis ont été utilisées comme bioindicateurs dans plusieurs situations particulièrement en Australie (Andersen & Majer, 2004) et plus récemment en Italie (Ottonetti *et al.* 2006). Elles ont été utilisées comme bioindicateurs de la résilience d'anciens sites miniers (Ottonetti *et al.* 2006 ; Ribas *et al.* 2011a ; Ribas *et al.* 2011b), d'habitats perturbés en milieu forestier (Carvalho & Vasconcelos, 1999 ; Leal *et al.* 2012), de traits et

situations écologiques dans différents types d'écosystèmes (Dias et *al.* 2012 ; Gollan et *al.* 2011) dont les agroécosystèmes en particulier (Peck et *al.* 1998). La pertinence de leur utilisation comme bioindicateurs réside sur la relative facilité à les collecter, leur très grande diversité taxonomique, leurs abondances, leur grande sensibilité à des changements du paysage et leur identification relativement facile (Kaspari & Majer, 2000). L'utilisation des fourmis comme bioindicateur des modèles de conception et d'entretien des vergers au Sénégal et la vérification de la fonction d'agent de contrôle biologique d'*Oecophylla longinoda* contre *B. dorsalis*, Latreille 1802 constituent les éléments essentiels de cette thèse.

L'étude présentée s'intéresse aux vergers à base de manguiers au Sénégal. La question de recherche est celle du pilotage du fonctionnement de ces vergers, par les modèles de conception et les pratiques culturales d'entretien. En particulier, elle s'intéresse aux effets de ces pratiques sur la biodiversité des fourmis, l'abondance de la fourmi *O. longinoda* agent de contrôle biologique contre les mouches des fruits et l'abondance de la mouche *B. dorsalis* principal ravageur des fruits au Sénégal.

Les objectifs spécifiques de ce travail de recherche sont :

- (i) L'évaluation de l'impact d'*Oecophylla longinoda* sur les taux d'infestations des mangues par *Bactrocera dorsalis* et ainsi la vérification de sa capacité à agir comme agent de contrôle biologique,
- (ii) Le suivi des fluctuations de populations de ces deux espèces en fonction du type de conception et d'entretien du verger,
- (iii) L'évaluation du critère de biodiversité (alpha et beta) des fourmis en tant qu'indicateur du type de conception et d'entretien du verger mais aussi du niveau d'intensification des pratiques.

La démarche mise en œuvre pour répondre aux objectifs fixés s'appuie sur des caractérisations fonctionnelle et biologique d'un réseau de vergers répartis sur six localités du Sénégal (Noto Gouye Diama, Pout, Ndoyenne, Sindia, Mboro et Thiès) et des expérimentations au laboratoire. Cela a permis de réaliser les activités ci-dessous :

- La caractérisation des communautés de fourmis dans les vergers,
- La typologie des vergers en fonction de leur conception et des pratiques culturales d'entretien,
- L'évaluation de l'efficacité d'*O. longinoda* contre le ravageur des mangues *B. dorsalis*,

- La caractérisation de la relation entre les abondances respectives de ces deux insectes et le type de conception et d'entretien du verger,
- La caractérisation de la relation entre la biodiversité des fourmis et le type de conception et d'entretien du verger.

Ce mémoire de thèse comporte quatre chapitres et nos résultats sont présentés sous formes d'articles scientifiques insérés dans certains de ces différents chapitres. Deux de ces articles sont soit déjà acceptés et deux autres sont soumis.

Le *chapitre 1* présente le contexte et les justificatifs de l'étude, définit les questions de recherche et présente les systèmes d'étude choisis pour traiter ces questions.

Le *chapitre 2* est un article de synthèse qui présente la bioécologie des fourmis et leurs rôles fonctionnels dans les agroécosystèmes.

Le *chapitre 3* définit les relations entre les caractéristiques du verger, les communautés de fourmis et les mouches des fruits *B. dorsalis*. Ce chapitre est structuré en 3 articles. Le premier présente l'impact de la fourmi *O. longinoda* sur la mouche des fruits *B. dorsalis* et la variation des abondances de ces deux insectes en fonction du type de verger. Le second article présente une liste synthétique des espèces de fourmis répertoriées de 1793 à nos jours au Sénégal dont celles qui sont associées aux vergers. Enfin le troisième article présente les interrelations entre les communautés de fourmis et les types de conception et d'entretien du verger.

La quatrième partie est un *chapitre* de discussion qui dégage à sa fin des perspectives sur la thématique de la recherche.

***CHAPITRE 1 : Présentation du contexte, du système d'étude et
du travail de thèse***

I. CONTEXTE DE L'ETUDE

I.1 L'importance de la production fruitière dans les Niayes et le plateau de Thiès

L'arboriculture fruitière au Sénégal occupe une place importante aussi bien du point de vue social qu'économique. Les estimations se chiffrent à 150 000 tonnes avec les mangues et les agrumes qui représentent respectivement 60 et 24 % de la production (ANSD, 2014). La partie des Niayes localisée dans les deux régions que sont Dakar et Thiès est une zone de productions intensives de fruits, phénomène attribué à l'existence d'atouts agro-climatiques pour la culture fruitière (Infoconseil, 1999) dont bénéficie le milieu. La zone des Niayes produit 40% du tonnage de mangues du Sénégal. La culture de mangues domine même si les cultures d'agrumes et d'anacardes commencent à avoir de l'ampleur. Les rendements de mangues à l'hectare sont passés à 10 tonnes dans les vergers traditionnels et 20 tonnes dans les vergers de types modernes (Rey & Dia, 2010). La papaye, la goyave et la banane y sont aussi cultivées mais dans une moindre mesure. Une grande part de la production fruitière est destinée au marché local (Touré & Fall, 2001) mais le marché international gagne de plus en plus du terrain dans ce secteur avec un créneau favorable pour la mangue (Infoconseil, 2006). Cette dernière prend la première place en termes de tonnage de produits agricoles exportés (Rey & Dia, 2010) principalement vers les marchés de l'Union Européenne. Rien que la filière mangues mobilise environ 23 000 emplois dont 13 000 hommes et 10 000 femmes.

I.2 Les variations dans les caractéristiques des agroécosystèmes à base de fruitiers

En Afrique de l'ouest, et plus particulièrement dans les régions de Thiès et Dakar, les agroécosystèmes à base d'arbres fruitiers présentent trois caractéristiques : (i) une très grande diversité des motivations des producteurs, de la biodiversité végétale et cultivée, des modes de conduite, des niveaux d'intensification et des conditions biotiques du milieu, (ii) la juxtaposition de ces agroécosystèmes formant de grands ensembles et (iii) la variation des caractéristiques physiques (abiotiques) du milieu (sols, microclimat, etc.) à de faibles distances.

I.2.1 Les caractéristiques et les modes de fonctionnement des agroécosystèmes de fruitiers

L'analyse de la biodiversité végétale et des modes de conduites des vergers a permis d'établir une typologie de ces agroécosystèmes dans les Niayes et le plateau de Thiès. Elle est réalisée à l'aide d'une analyse hiérarchique multifactorielle (HMFA) sur un groupe de variables décrivant la biodiversité cultivée et un groupe de variables décrivant les modes de conduite des vergers. Une analyse hiérarchique agglomérative (AHC) appliquée sur les résultats des deux précédents HMFA a permis de classer les vergers en quatre types de systèmes de culture selon leurs modes de conception et les pratiques d'entretien des cultures (Grechi et al., 2013). Ces quatre types de vergers sont: (1) les « vergers de manguiers diversifiés sans intrant »; (2) les « vergers de manguiers avec de faibles intrants »; (3) les « vergers à *Citrus* prédominants avec un niveau intermédiaire d'intrants » et (4) les « grands vergers de manguiers ou d'agrumes prédominants avec des niveaux intermédiaires d'intrants ». Les caractéristiques détaillées de ces agroécosystèmes sont détaillées dans la section ci-après, et le détail des variables utilisées pour les caractériser figure en annexes du document.

I.2.2 Description des types de verger

❖ Type1 : vergers de manguiers diversifiés sans intrants

Les vergers de type 1 sont ceux avec une grande composition de manguiers (86% en moyenne) et une faible composition en agrumes. Ils présentent également une grande diversité variétale de manguiers. La variété polyembryonnaire (Boucodiékhhal) dédiée au marché local ou à l'alimentation familiale est plus abondante que la variété « Kent » dans ce type de verger. La densité moyenne de plantation est faible et aucune pratique de gestion (ramassage de fruits piqués, fertilisation, irrigation, application de pesticides et entretien du sol) ni aucune utilisation secondaire du verger pour le maraichage est effectué dans ce type de verger. La majorité des arbres sont très grands et âgés d'une trentaine d'années.



Photo : L. Diamé

Photo 1: Exemple de verger de type 1 (village de Peykouk, région de Thiès, Sénégal)

❖ Type 2 : vergers de manguiers à faibles intrants

Les vergers de type 2 ont aussi une grande composition en manguiers (85% en moyenne) et une faible composition en agrumes (pamplemoussiers, mandariniers). La variété « Boucodiékhhal » est celle la plus abondante également (dans 80% des vergers de type 2). Pour un certain nombre d'entre eux (20%), c'est la variété « Kent » qui prédomine. La densité de plantation et la variabilité des distances entre les arbres sont également faibles dans ces vergers. Les niveaux d'entretien (ramassage des fruits infestés de mouches, fertilisation, irrigation, application de pesticides, entretien du sol) et l'utilisation secondaire pour le maraichage dans ces vergers sont faibles.



Photo : L. Diamé

Photo 2: Exemple de verger de type 2 (village de Pout, région de Thiès, Sénégal)

❖ Type 3 : vergers à *Citrus* prédominants avec un niveau intermédiaire d'intrants

Les vergers de type 3 sont des vergers avec une forte composition en agrumes (65% en moyenne), constitués de pamplemoussiers, d'orangers et de mandariniers alors que la composition en manguiers est faible. Ces vergers enregistrent les plus fortes diversités d'arbres fruitiers. Leurs compositions en papayers et goyaviers sont également les plus importantes. La densité de plantation est plus importante mais ils enregistrent une hétérogénéité en ce qui concerne l'espacement entre les arbres. Tous les vergers sont irrigués et fertilisés. Les niveaux de gestion de ces vergers (irrigation, fertilisation et ramassage des fruits infestés de mouches) sont relativement importants.



Photo : L. Diamé

Photo 3: Exemple de verger de type 3 (village de Ndoyenne, région de Dakar, Sénégal)

- ❖ Type 4 : grands vergers de manguiers ou de Citrus prédominant avec des niveaux intermédiaires d'intrants

Les vergers de type 4 sont constitués de très faibles diversités fruitière et de variétés de manguiers. Ce sont des vergers de grandes superficies. La variété « Kent » est la plus importante pour les manguiers suivie de la variété « Keitt ». La plupart d'entre eux sont des vergers mono-spécifiques de manguiers ou des vergers mixtes d'agrumes (plusieurs espèces). Ils enregistrent les niveaux de gestion les plus importants de tous les types de vergers. Ceux mono-spécifiques de manguiers sont dédiés au marché de l'export. Tous les vergers sont traités avec des pesticides. Une faible variabilité de la densité de plantation est notée dans ces vergers, indiquant des plantations homogènes.



Photo : L. Diamé

Photo 4: Exemple de verger de type 4 (village de Notto Gouye Diama, Région de Thiès, Sénégal)

I.3 L'espèce *Bactrocera dorsalis* et ses incidences économiques

I.3.1 Présentation de *Bactrocera dorsalis*

I.3.1.1 Systématique

Bactrocera dorsalis est originaire d'Asie et fut détectée pour la première fois en Afrique en 2003 précisément au Kenya (Lux et al., 2003) puis en Tanzanie (Mwatawala et al., 2004). En 2004, sa présence a été également signalée en Afrique de l'Ouest au Sénégal (Vayssières, 2004) et au Bénin (Vayssières et al., 2005). Elle est maintenant bien installée en Afrique de l'Ouest et dans toute l'Afrique sub-saharienne. Elle a des hôtes multiples, aussi bien des plantes sauvages que cultivées du fait de son caractère très polyphage. En Afrique de l'Ouest et centrale, 46 espèces végétales appartenant à 23 familles botaniques ont été répertoriées comme hôtes de *B. dorsalis* (Goergen et al., 2011) ; ce qui rend la gestion de ce ravageur d'autant plus difficile.

La position systématique de *Bactrocera dorsalis* (Hendel) est actuellement :

Embranchement : Arthropoda

Classe : Insecta

Ordre : Diptera

Famille : Tephritidae

Sous-famille : Dacinae

Genre : *Bactrocera*

Espèce : *dorsalis*

I.3.1.2 Origine et répartition géographique

Bactrocera dorsalis est originaire d'Asie et fut détectée en Afrique en 2003 précisément au Kenya (Lux et al., 2003) puis en Tanzanie (Mwatawala et al., 2004). En 2004, sa présence a été également signalée en Afrique de l'Ouest, au Sénégal (Vayssières, 2004) et au Bénin (Vayssières et al., 2005). Elle est bien installée en Afrique de l'ouest et dans toute l'Afrique subsaharienne, et a des hôtes multiples liés à son caractère polyphage au niveau des plantes sauvages et cultivées. En Afrique de l'Ouest et centrale 46 espèces végétales appartenant à 23 familles botaniques ont été répertoriées comme hôtes de *B. dorsalis* (Goergen et al., 2011) ; ce qui rend d'autant plus difficile la gestion de ce ravageur.



Photo : L. Diamé

Photo 5: Femelle de *Bactrocera dorsalis* déposant ses œufs sur une mangue

I.3.2 Incidences économiques de *Bactrocera dorsalis* au Sénégal

La mouche *B. dorsalis* cause des pertes économiques à tous les segments de la chaîne de valeur mangue. Dans les vergers de manguiers, cette mouche est responsable des pertes de production d'environ 30 à 50% dans la région des Niayes et 60% en zone de Casamance, partie sud du pays (Ternoy et al 2006; Ndiaye et al., 2012). Contrairement à d'autres mouches de fruits comme les *Carpomya* sp. qui se développent dans les *Ziziphus* spp. (notamment *Zizyphus mauritiana* var Gola) sans altérer la pulpe, *B. dorsalis* provoque une putréfaction avec une odeur nauséabonde des fruits qu'elle infeste (Ndiaye et al., 2012). Quand l'infestation est récente, les traces de piqûres peuvent ne pas être détectées par l'acheteur. Mais au bout de quelques jours ces fruits sont immangeables et doivent être jetés. Cela a causé de lourdes pertes financières aux différents intervenants de la filière, à commencer par les producteurs qui ne peuvent ni vendre, ni consommer les fruits atteints mais aussi à tous ceux qui commercialisent les mangues sur les marchés locaux, nationaux et sous-régionaux (grossistes, transporteurs, détaillants) qui n'auraient pas su détecter la présence des mouches au moment de l'achat. Ces pertes sont particulièrement importantes ces dernières années qui ont suivies 2004, année de la détection *B. dorsalis* au Sénégal. Depuis, les commerçants commencent à mieux détecter les mangues infestées pour limiter leurs pertes financières mais le manque à gagner est d'autant plus important pour les producteurs. Ce commerce local (le long des routes et en bordure des vergers) favorise

par ailleurs la dissémination des mouches des fruits. Les mangues originaires de la Casamance et qui sont plus précoces que celles des Niayes, arrivent en premier sur les grands marchés urbains. Les mangues infestées sont jetées et provoquent une multiplication accélérée de ravageur et l'infestation des vergers périurbains. Au niveau des usines de transformation, les pertes sont importantes à deux niveaux. D'une part, les fruits doivent être triés avant le process (coût supplémentaire de main d'oeuvre et pertes de matière première), d'autre part il suffit de quelques fruits infestés qui auraient échappé aux trieurs pour polluer un fût de pulpes. Les mouches des fruits *B. dorsalis* sont classées insectes de quarantaine dans de nombreux pays importateurs (EPPO A1 List 2013). Si un seul fruit infesté est détecté à l'arrivée, le lot entier est renvoyé dans le pays d'origine ou incinéré aux frais de l'expéditeur. Si le nombre de saisies est important, le pays exportateur peut être mis sous embargo.

I.4 La fourmi *Oecophylla longinoda*

Embranchement : Arthropoda

Classe : Insecta

Ordre : Hymenoptera

Famille : Formicidae

Sous-famille : Formicinae

Genre : *Oecophylla*

Espèce : *longinoda*



Photo : L. Diamé

Photo 6: Nid de fourmis oecophylles (*O. longinoda*) sur manguier

I.5 Conclusion partielle: émergence de deux questions de recherche

La prise en compte des contrastes notés dans le fonctionnement des agroécosystèmes à base de fruitiers dans les régions de Dakar et Thiès et les dégâts dus aux mouches des fruits *B. dorsalis* ont mis en avant deux principales préoccupations:

- 1) La première préoccupation est d'ordre phytosanitaire et suscite directement un enjeu socio-économique important pour la production fruitière. **En effet, dans le contexte de la lutte biologique exercée par *O. longinoda* sur *B. dorsalis*, quel lien pourrait-il y avoir entre le fonctionnement contrasté dans les agroécosystèmes et les populations de ces deux insectes ?**
- 2) La seconde préoccupation est d'ordre écologique et interpelle aussi bien la notion de diversité myrmécologique que la structure des communautés de fourmis dans ce fonctionnement contrasté des vergers. **En effet, dans un contexte d'étude de l'état d'équilibre des agroécosystèmes fruitiers, la notion d'utilisation de la biodiversité des fourmis comme indicateur dans ce type de milieu (agroécosystèmes au climat semi-aride) est ici abordée. Existe-t-il une relation entre le fonctionnement contrasté des agroécosystèmes et la biodiversité des fourmis ?**

II. LE SYSTEME D'ETUDE

II.1 Présentation de la zone d'étude

II.1.1 Localisation des agroécosystèmes

Les agroécosystèmes étudiés sont globalement situés dans la région des Niayes et sur le plateau de Thiès au Sénégal. La zone des Niayes au Sénégal est une bande de la côte occidentale du pays caractérisée par des dépressions interdunaires s'étendant de Dakar à Saint-Louis sur une distance d'environ de 200 km et 5 km de large. C'est une zone située entre 14°54' et 15°54' de latitude nord et 17°20' et 16°60' de longitude ouest qui offre des conditions naturelles très favorables pour une mise en valeur agricole. Le plateau de Thiès se situe dans le bassin sédimentaire Sénégal-mauritanien.

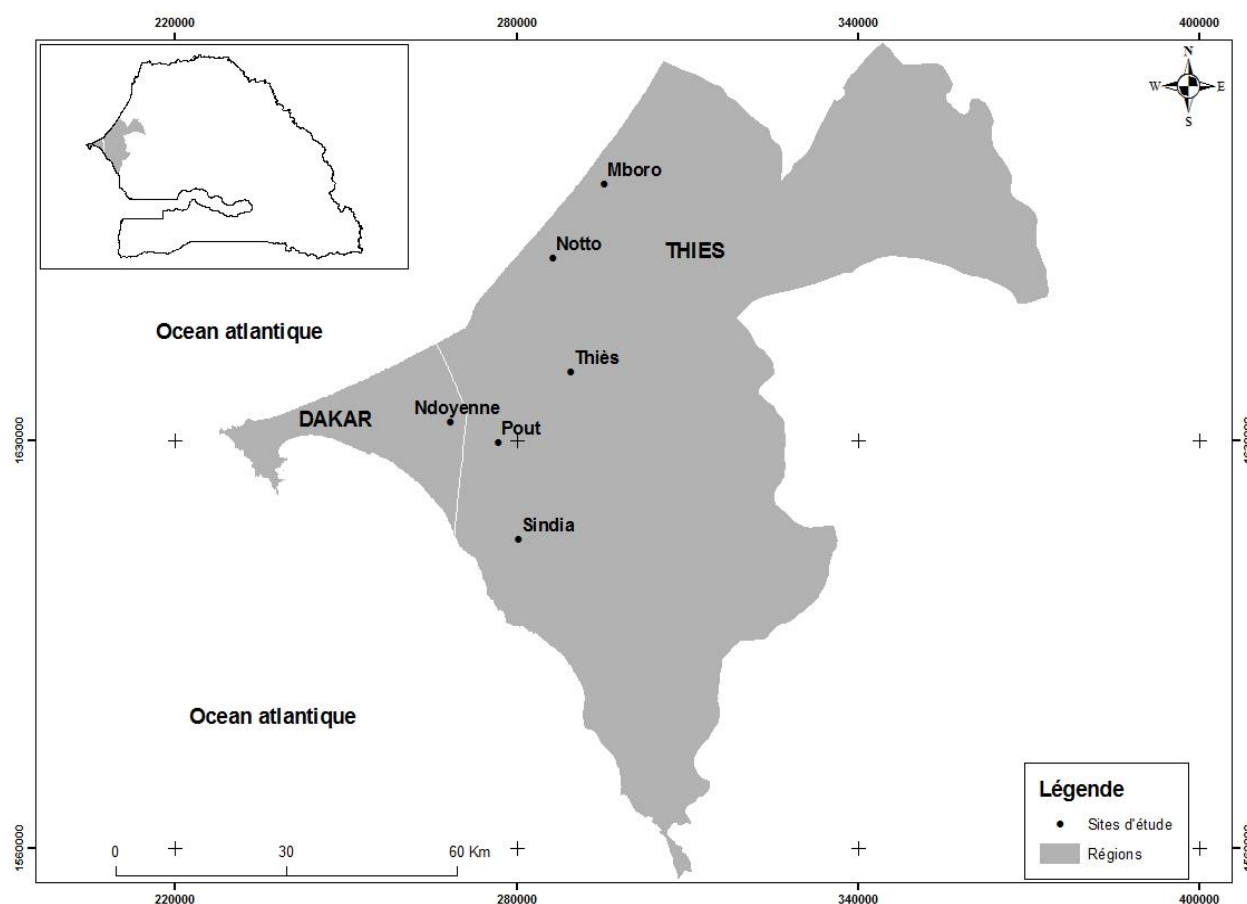


Figure 1: Positionnement des sites d'étude au niveau des Niayes et du plateau de Thiès (Sénégal)

II.1.2 Le milieu physique

II.1.2.1 Climatologie

Les deux régions sont caractérisées par un climat soudano-sahélien avec une pluviométrie monomodale de juillet à septembre (entre 600 mm et 750 mm par an entre 2008 et 2012). Toutefois, si le climat soudano-sahélien est le même au niveau de ces deux régions, les températures baissent progressivement du centre du pays vers la côte occidentale. En effet, les localités situées dans les Niayes bénéficient de l'influence des vents maritimes leur permettant d'enregistrer plus longuement de faibles températures que les localités situées dans le plateau de Thiès. En termes de pluviométrie, il n'existe pas de différence notable entre ces deux régions.

II.1.2.2 Pédologie

Les Niayes sont caractérisés par des sols hydromorphes très organiques (semi-tourbeux à très humifères). Mais des relations plus ou moins évidentes avec le milieu marin (existence d'une nappe salée sous-jacente à la nappe d'eau douce, communication ancienne ou actuelle temporaire avec la mer), provoquent dans ces sols des phénomènes de salure conduisant à la genèse de sols halomorphes assez généralement répandus dans l'ensemble des Niayes. Les données de l'analyse physico-chimique indiquent, d'une façon générale, pour les sols des Niayes une fertilité très appréciable dont les principaux facteurs se trouvent étroitement liés à l'abondance de matière organique.

Les sols au niveau du plateau de Thiès sont caractérisés par une majorité de types ferrugineux tropicaux non lessivés dont les plus répandus sont les sols *diors* (70% des surfaces cultivables), les sols *decks* et *decks diors* (25 % des surfaces cultivables) et les sols de *bas-fonds* (2 à 3 % des surfaces cultivables) favorables aux cultures maraichères.

II.2 Espèces fruitières cultivées dans les vergers

Un inventaire des espèces fruitières pérennes et semi-pérennes dans les agroécosystèmes étudiés a recensé un nombre total de 18 espèces. Ce sont le manguier (*Mangifera indica* L.), les agrumes (*Citrus reticulata* Blanco, *C. sinensis* (L) Osbeck, *C. paradisi* Macfad, *C. limon* L. et *Fortunella* sp.), l'anacardier (*Anacardium occidentale* L.), l'avocatier (*Persea americana* Miller), le palmier (*Elaeis guineensis* Jacq), l'ananas (*Ananas comosus* L.), le Bananier (*Musa basjoo* Sieb.), le cerisier (*Prunus* sp), le corossolier (*Annona muricata* L.), le colatier (*Cola acuminata* Beauv.), le papayer (*Carica papaya* L.), le goyavier (*Psidium guajava* L.), le grenadier (*Punica granatum* L.) et le sapotillier (*Manilkara zapota* L.). Dans l'échantillon ayant

servi à caractériser les agroécosystèmes, les agrumes et les manguiers représentent respectivement 28,75% et 61,11% des arbres (Tableau 1). Mais étant donné que les parcelles pures de manguiers et d'agrumes correspondent à des surfaces beaucoup plus importantes que les parcelles mixtes, on peut considérer que les manguiers et les agrumes représentent plus de 95% en surface des espèces fruitières de la zone.

Tableau 1 : Nombre d'arbres de la base de données par espèce fruitière recensée dans les agro-écosystèmes étudiés.

Espèce	Total	%
Anacardier (<i>Anacardium occidentale</i>)	55	0,6
Ananas (<i>Ananas comosus</i>)	2	0,02
Avocatier (<i>Persea americana</i>)	25	0,27
Bananier (<i>Musa basjoo</i>)	23	0,25
Cerisier (<i>Prunus</i> sp.)	1	0,01
Citronnier (<i>Citrus limon</i>)	369	4,05
Colatier (<i>Cola acuminata</i>)	2	0,02
Corossolier (<i>Annona muricata</i>)	99	1,78
Goyavier (<i>Psidium guajava</i>)	38	0,41
Grenadier (<i>Punica granatum</i>)	8	0,08
Kumquat (<i>Fortunella</i> sp.)	1	0,01
Mandarinier (<i>Citrus reticulata</i>)	1139	12,49
Manguier (<i>Mangifera indica</i>)	5568	61,11
Oranger (<i>Citrus sinensis</i>)	472	5,18

Palmier (<i>Elaeis guineensis</i>)	1	0,01
Papayer (<i>Carica papaya</i>)	170	1,86
Pomelo (<i>Citrus paradisi</i>)	1118	12,27
Sapotillier (<i>Manilkara zapota</i>)	19	0,2

III. PRESENTATION DU TRAVAIL DE THESE

III.1 Matériel et méthodes

III.1.1 Matériel

L'étude a été effectuée sur un réseau de vergers répartis dans six sites des deux régions de Dakar et Thiès : NOTTO (14°59' N ; 17°00' O), POUT (14°45' N ; 17°02' O), NDOYENNE (14°46' N ; 17°09' O), THIES (14°45' N ; 16°52' O), MBORO (15°08' N ; 16°54' O) et SINDIA (14°34' N ; 17°02' O). Un seul site a été choisi dans la région de Dakar (NDOYENNE) alors que les 5 autres sont dans la région de Thiès.

La biodiversité des fourmis a été estimée sur un échantillon de 51 vergers. Pour un sous-échantillon de 15 vergers, des mesures d'abondances de la fourmi *O. longinoda* (Latreille) et de la mouche des fruits *B. dorsalis* (Hendel) ont été effectuées. Un verger a été choisi parmi ces 15 pour mesurer les taux d'infestation de mangues par la mouche des fruits *B. dorsalis* sur des manguiers « avec colonie » et des manguiers « sans colonie » d'*O. longinoda*.

III.1.2 Méthodes

III.1.2.1 Expérimentations

III.1.2.1.1 Echantillonnage des fourmis dans les vergers

Dans chaque verger en 2012, une collecte de fourmis a été effectuée, une fois en période sèche (mars à juin) et une fois en période humide (juillet à septembre). Pour chaque période, vingt pièges à fosse (pitfall traps, Photo 7) étaient placés dans tous les microhabitats du verger (milieux ensoleillés, milieux ombrageux, haies). Les pièges étaient constitués de pots en plastique (diamètre = 7.5 cm, hauteur = 8 cm), enterrés jusqu'à ce que leur ouverture soit au même niveau que la surface du sol, puis remplis à moitié de leur volume de liquide savonneux. Les pièges restaient dans les vergers pendant 48h. Un échantillonnage complémentaire (des

pièges alimentaires à base de sardine d'une part et collecte manuelle sur le sol, les troncs d'arbres, les bois morts, d'autre part) était ensuite effectué le jour du relevé des pièges. Les fourmis collectées étaient séparées en morphotypes et placées dans de l'alcool 80° pour la conservation. Ainsi, les morphotypes représentatifs étaient identifiés au rang d'espèce par le Docteur Brian Taylor (par l'intermédiaire de son site web en ligne : The Ants of (sub-Saharan) Africa à l'adresse http://www.antsofafrica.org/ant_species_2012/new_records_senegal.htm



Photo : L. Diamé

Photo 7: Dispositif d'un piège à fosse ou pitfall trap

III.1.2.1.2 Suivi des infestations des fruits sur manguiers « avec colonie » et sur manguiers « sans colonie » de fourmis oecophylles

Le potentiel des fourmis oecophylles à réduire les dégâts dus aux mouches des fruits *B. invadens* a été étudié dans un verger en 2013, au cours de trois périodes (mai, juillet et août). Ce verger était un verger de manguiers (cv Kent) appartenant au type 3. Pour chaque période, nous avons récolté un échantillon de 200 mangues (25 fruits par arbres) provenant de quatre manguiers « avec colonie » d'oecophylles et de quatre autres manguiers « sans colonie ». Les fruits ont été gardés dans des cages couvertes de moustiquaire. Une semaine après, les fruits piqués ont été isolés et comptés afin de déterminer le taux d'infestation des mangues pour chaque arbre. Les fruits piqués d'un même arbre ont ensuite été incubés ensemble dans des seaux fermés à l'aide d'un tissu. Les pupes extraites de ces fruits ont été comptées et les adultes ont été identifiés

après leur émergence. Le nombre de pupes par fruit infesté et par lot de 25 fruits a été déterminé pour chaque arbre.

III.1.2.1.3 Suivi de l'abondance de la fourmi *Oecophylla longinoda* dans les vergers

Le suivi de l'abondance des fourmis oecophylles (Photo 7) a été réalisé en 2012 dans 15 vergers selon la méthode développée par Peng et Christian (2004). Vingt arbres (manguiers ou agrumes) choisis au hasard ont été suivis par verger. Pour chaque arbre, les observations s'effectuaient tous les 15 jours sur toutes les branches principales situées à la hauteur de l'observateur avec les bras dressés (~2.40m). Les branches principales sont les branches directement ramifiées au tronc de l'arbre mais aussi celles ramifiées à ces dernières. Leur nombre varie de trois à dix selon les arbres. Cette méthode consiste à compter le nombre de fourmis oecophylles qui se déplacent sur chaque branche principale de l'arbre, ce qui permet de donner pour chaque branche une note d'abondance des fourmis selon l'échelle suivante : 0, aucune fourmi ; 0.5, une à 10 fourmis et 1, plus de 10 fourmis. Ce suivi s'effectuait pendant une période de quatre mois distribués en saison sèche (du 31 mars au 26 juin 2012) et en saison humide (du 23 juillet au 06 septembre 2012). Les observations se faisaient après 9:30 parce que la période d'activité intense des fourmis oecophylles se situe entre 9:30 et 16:30 (Vayssières et *al.*, 2011). L'abondance des fourmis oecophylles de chaque arbre était déterminée à chaque date de suivi et correspond à la moyenne des notes obtenues sur les branches principales de celui-ci. Les abondances de chaque arbre étant assez constantes aux différentes dates de suivi d'une même saison (résultats non publiés), une abondance moyenne par verger et par saison a été calculée.

III.1.2.1.4 Suivi de l'abondance de la mouche des fruits *Bactrocera dorsalis* dans les vergers

Le suivi de l'abondance des mouches des fruits *B. dorsalis* a été réalisé tout au long de l'étude par piégeage avec des paraphéromones sexuelles. Dans chacun des vergers, trois pièges à mouches ont été installés. Les pièges étaient constitués de pots en plastique (tephri-trap, Photo 8) contenant du Metyl-eugenol, un attractif sexuel, attirant spécifiquement les mâles de mouches des fruits *B. dorsalis*, et un insecticide pour les tuer. Les pièges étaient suspendus à des branches au niveau du tiers inférieur de la canopée des arbres. Le fil métallique accroché au couvercle du piège était enduit de graisse pour prévenir l'activité prédatrice d'*O. longinoda* sur les adultes de mouches des fruits piégées au fond des tephri-trap (Vayssières et *al.*, 2009). Les mouches piégées étaient enlevées du piège et comptées toutes les semaines et les attractifs comme les insecticides étaient remplacés tous les mois. Pour chaque verger, nous avons calculé la moyenne des relevés hebdomadaires des trois pièges. L'abondance des mouches des fruits *B.*

dorsalis par verger et par saison a ensuite été calculée en faisant la somme des relevés hebdomadaires moyens du verger aux dates de suivi comprises entre le 10 avril et le 09 juin 2012 (saison sèche) et entre le 19 juillet et le 17 septembre 2012 (saison pluvieuse).



Photo 8: Dispositif d'un piège tephri trap

III.1.2.2 Traitement et analyses des données

III.1.2.2.1 Logiciels utilisés

Les données collectées au cours de cette étude ont été traitées avec le logiciel Excel de Microsoft 2013. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (R Development Core Team 2011, version 2.13.0).

III.1.2.2.2 Tests statistiques et analyses écologiques

❖ Tests de l'effet d'*O. longinoda* sur l'infestation des mangues par *B. dorsalis*

Sur le verger suivi en 2013, nous avons utilisé un modèle linéaire généralisé (GLM) avec loi de distribution binomiale, suivi d'une analyse de la déviance avec un test du χ^2 pour voir l'effet du facteur fourmi (deux niveaux : « avec » et « sans » colonie de fourmis oecophylles) sur le taux de mangues infestés. Nous avons utilisé une méthode similaire pour tester l'effet du facteur

fourni sur l'abondance des mouches des fruits (nombre total de pupes issues des 25 fruits) mais avec une erreur de distribution de Poisson dans ce deuxième cas.

❖ **Corrélation entre abondances d'*O. longinoda* et abondances de *B. dorsalis* dans les vergers**

Dans les 15 vergers observés en 2012, un test de corrélation de Pearson a été réalisé entre les abondances de fourmis *O. longinoda* et celles de mouches des fruits *B. dorsalis*. Ensuite ces abondances ont été comparées en fonction du type de verger en utilisant un test de Kruskal-Wallis. Lorsqu'une différence significative a été détectée après un test de Kruskal-Wallis, des tests de comparaison multiple étaient réalisés pour séparer les modalités du facteur.

❖ **Construction d'une typologie des vergers sur la base des communautés de fourmis**

Les données obtenues lors de l'inventaire des fourmis nous ont permis de calculer l'abondance de chaque espèce par verger, qui représente ici le nombre de pièges à fosses ayant attrapé l'espèce et non le nombre total d'espèces piégées. Une typologie a été réalisée sur 49 vergers en utilisant leurs communautés de fourmis. Cette typologie et toutes les autres analyses sur la biodiversité des fourmis ont été réalisées sur les données compilées de deux saisons. La compilation des données sur deux saisons pour les communautés de fourmis est aussi réalisée dans le but de mieux les caractériser dans les vergers. Une matrice de similarité de Bray-Curtis a été d'abord calculée sur les abondances log-transformées puis un dendrogramme des vergers a été construit en se basant sur les distances par paires de Bray-Curtis et avec comme critère de classification celui de Ward.

❖ **Indices de diversité et tests afférents**

-Diversité alpha

La richesse spécifique et l'indice de diversité de Shannon-Wiener (H') (diversité α) ont été déterminés pour chaque verger. La richesse spécifique désigne le nombre total d'espèces recensées dans une communauté alors que l'indice de Shannon-Wiener est une fonction de l'abondance qui mesure la diversité des espèces vivant dans un milieu. L'indice de diversité de Shannon-Wiener a été calculé selon la formule suivante :

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln(p_i)$$

avec p_i l'abondance relative de chaque espèce c'est-à-dire le rapport entre le nombre d'individus de l'espèce i (ici c'est égal au nombre de pièges ayant attrapé l'espèce) sur le nombre total d'individus de la communauté (nombre total de pièges).

Les variations de richesse et de diversité des fourmis en fonction du type de verger (basé sur la conception et les pratiques) ont été analysées par un test de Kruskal-Wallis. Un test de comparaison multiple a été effectué ensuite pour séparer les modalités du facteur au cas où un effet significatif est détecté. L'effet des caractéristiques des vergers (végétation cultivée, densité de plantation, entretien du sol, pâturage, autres cultures, irrigation, pesticide, fertilisation, vigueur des arbres, hauteur des arbres, couverture du sol, coefficient de variation de la couverture du sol et la litière) sur la diversité et la richesse a été évalué en utilisant un modèle linéaire généralisé (GLM) avec une loi de distribution gaussienne, suivi d'une analyse de la déviance de type-II avec un test F.

❖ Analyses de redondance (RDA)

Les relations entre les variables de conception et des pratiques de gestion des vergers et les communautés de fourmis ont été étudiées à travers une analyse de redondance (RDA). Cette analyse est une méthode qui combine une régression linéaire et une analyse en composante principale. Avant de réaliser la RDA, la matrice d'abondance des espèces a subi une transformation de Hellinger afin de conformer les données aux conditions d'application de la méthode statistique. L'avantage de cette méthode est de représenter sur un même espace factoriel les espèces, les variables de conception et d'entretien et les types de vergers. Pour éviter que les espèces rares influencent l'analyse, nous avons retiré les espèces détectées dans moins de 10 pièges dans le jeu de données. La considération d'une espèce rare est arbitraire et dépend de l'appréciation de l'observateur pour une espèce rare dans le milieu d'étude. Le traitement des espèces rares est problématique car elles peuvent influencer fortement les résultats de l'analyse sans que cela soit lié à un effet des variables environnementales sur les communautés. Nous avons donc retenu 44 espèces dans l'analyse de redondance (RDA).

III.2 Conclusion du chapitre 1

La prise en compte et l'analyse de l'information sur le fonctionnement des agroécosystèmes à base de fruitiers étudiés ont permis de disposer de deux principales composantes fonctionnelles entre lesquelles l'étude va établir des relations:

- une composante biologique, caractérisée par les éléments biologiques du système (végétation naturelle et cultivée dans sa forme et son état), les fourmis (communautés

avec un intérêt particulier porté sur *O. longinoda*) et un bioagresseur (la mouche des fruits *B. dorsalis*),

- une composante technique qui comprend les modalités de conception et les actes techniques d'entretien des cultures implantées au sein des agroécosystèmes, parmi lesquels il y a les interventions phytosanitaires, l'irrigation, la fertilisation, le travail du sol et l'utilisation secondaire du verger (maraichage).

Chacun de ces groupes de composantes est caractérisé par un ensemble de variables. Les composantes biologiques sont caractérisées par des variables mesurées sur les arbres fruitiers du verger et des variables quantifiées par estimation (état de la végétation) et par calcul d'abondances (*O. longinoda*), de richesses et d'indices de diversité (communautés de fourmis). Les variables de la composante technique quant à elles sont issues de résultats d'enquêtes auprès des producteurs (cf annexe 8) et d'observations directes de certaines pratiques.

Avec des méthodes d'analyses adaptées pour répondre aux objectifs fixés au départ, le système d'étude apparaît dès lors suffisamment renseigné pour établir des relations entre le fonctionnement des agroécosystèmes, les fourmis et les mouches des fruits *B. dorsalis*.

***CHAPITRE 2 : Bioécologie et rôles fonctionnels des fourmis
dans les agroécosystèmes***

« Synthèse bibliographique »

Chapitre 2 : BIOECOLOGIE ET ROLES FONCTIONNELS DES FOURMIS DANS LES AGROECOSYSTEMES.

Synthèse bibliographique

Article 1

Ants: biological control agents and major functional elements in fruit agroecosystems

Lamine DIAME^{2,4*}, Jean-Yves REY^{1,2}, Jean-François VAYSSIERES^{1,3}, Isabelle GRECHI⁵, Anaïs CHAILLEUX², Karamoko DIARRA⁴

*Manuscrit soumis à **Fruits** le 30/07/2015*

Introduction

Les fourmis sont un groupe taxonomique d'une très grande diversité. Elles présentent une organisation sociale remarquable qui leur a permis d'être omniprésentes à la surface de la planète. Elles constituent environ 10% de la biomasse animale terrestre. Les fourmis procurent des services écosystémiques dans les agrosystèmes en jouant un rôle important dans la bioturbation des sols, la régulation d'insectes phytophages et sont en même temps des pollinisateurs accidentels de fleurs. La multiplicité de leurs rôles est liée à la grande diversité de leur groupe par rapport à d'autres taxons animaux (Majer, 1983 ; Folgarait, 1998). Dans ce chapitre seront abordés la bioécologie et les rôles des fourmis dans les agroécosystèmes. Un focus sera fait sur *Oecophylla longinoda* et ses interactions avec d'autres insectes des agroécosystèmes. Il sera également question d'aborder la notion de l'utilisation de leur biodiversité comme bio-indicateur dans diverses situations écologiques. A cause de leur abondance, leur diversité et leur comportement prédateur, les fourmis ont une influence majeure dans les écosystèmes (Caroll and Jansen, 1973 ; Way and Khoo, 1992 ; Folgarait, 1998 ; Vayssières et al., 2015).

I. Généralités sur la bio-écologie des fourmis

Les fourmis, bien que petites créatures fragiles semblant insignifiantes individuellement parlant, sont un des groupes dominants de la biomasse animale mondiale. Mais elles sont innombrables et leur importance est valorisée autant par leur nombre que par le comportement social associé au nombre. Plus de 12 000 espèces de fourmis étaient répertoriées en 2010, mais on découvre de nouvelles espèces chaque mois, essentiellement en zone tropicale et dans la canopée (explorée depuis une trentaine d'années). Les ébauches du comportement social des fourmis sont apparues au Crétacé (il y a environ 100 millions d'années) et n'a cessé d'évoluer jusqu'à nos jours. Les fourmis sont des organismes eusociaux caractérisés par une répartition des individus de la colonie en castes. Globalement, il y a la reine dont la fonction principale est reproductrice, les soldats qui assurent la défense de la colonie et les ouvrières qui sont spécialisées à des tâches comme la recherche de nourriture, les soins et l'élevage du couvain (œufs, larves et pupes). Grâce à leur organisation en société qui est un modèle du genre et soutenue par un système de communication très efficace, grâce à leur faculté d'adaptation à l'environnement, les fourmis ont réussi à coloniser presque la Terre entière. Elles sont présentes dans tous les habitats terrestres du monde sauf le Groenland et l'Antarctique (habitats glaciaux). Leurs habitats de prédilection restent, malgré tout, les régions tropicales connues pour la richesse de leur faune et la très grande variété de leurs espèces de fourmis.

On peut les diviser principalement par exemple en (i) fourmis collectrices de graines et divers débris végétaux, (ii) fourmis champignonnistes, (iii) fourmis « légionnaires », (iv) fourmis prédatrices spécialisées, (v) fourmis prédatrices généralistes terricoles, (vi) fourmis prédatrices généralistes arboricoles, ... Dans cette dernière catégorie figurent les oecophylles (*O. longinoda* en Afrique et *Oecophylla smaragdina* (Fabricius) en Asie). Les fourmis produisent naturellement des fongicides, des insecticides notamment pour protéger leurs cultures (de feuilles, de champignons...), mais aussi des virucides, des bactéricides (dont les principes actifs ne sont pas parfaitement connus) pour protéger leurs stades pré-imaginaux (œufs, larves et pupes).

II. Les fourmis: agents de lutte biologique et éléments fonctionnels importants dans les agroécosystèmes fruitiers

II.1 Les fourmis: agents de contrôle naturels

II.1.1 Généralités sur l'activité protectrice des fourmis vis-à-vis des plantes

Les fourmis ont développé des associations fortes avec différents organismes de leur environnement et notamment des relations d'interactions mutualistes avec les plantes. Dans ces relations, chaque partenaire bénéficie de la présence de l'autre. Les fourmis protègent les plantes contre les insectes phytophages (phyllophages, carpophages, sapro-xylophages et xylophages) et en contrepartie, la plante fournit aux fourmis des abris, des ressources alimentaires ou des sites de reproduction (Dejean et al., 2005 ; 2008 ; 2009 ; 2010). Le rôle protecteur des fourmis repose sur une activité de prédation, sur un phénomène de répulsion ou sur un phénomène limitant le développement de microorganismes pathogènes de plantes. La présence de certains composés chimiques portés par les fourmis limite le développement de champignons et bactéries pathogènes de végétaux (Letourneau, 1998).

La prédation directe d'insectes par les fourmis peut dépendre du type d'insecte, de sa taille, de sa densité dans son milieu, ainsi que du comportement de l'espèce de fourmi prédatrice (Philpott et al., 2008). Le genre *Oecophylla* est un genre prédateur généraliste très agressif. Ses espèces arrivent à capturer presque tous les insectes qui sont sur leurs territoires de chasse (primaires et secondaires). A l'échelle de l'écosystème, l'efficacité de la prédation par les ennemis naturels dépend également du niveau de complexité des interactions entre les ennemis naturels (Casuala et al., 2006 ; Philpott et al., 2006). En milieu agricole, c'est la colonisation des habitats par des espèces de fourmis dominantes organisées sous la forme de « ant mosaic » (*i.e.*, distribution des espèces dominantes en patches, de telle manière que leurs territoires ne se recoupent pas) (Leston, 1973 ; Majer, 1972 ; 1976 ; Djieto-Lordon and Dejean, 1999 ; Blüthgen and Stork, 2007) qui offre le contrôle le plus efficace contre les insectes phytophages du fait de la recherche de proies animales ou de miellat comme élément catalyseur (Blüthgen et al., 2004). Cela a notamment été observé chez les espèces *O. longinoda* (Peng and Christian, 2013), *Tetramorium aculeatum* (Mayr), *Crematogaster* spp. (Tadu et al., 2014) et *Anonychomyrma gilberti* (Forel) (Blüthgen et al., 2004). L'activité prédatrice des fourmis conduisant à réduire la pression des insectes phytophages (*sensu lato*) repose sur deux principaux mécanismes: la chasse coopérative qui est considérée comme le mécanisme le plus élaboré et la chasse solitaire dite « stochastique ». La chasse coopérative est utilisée par des espèces telles que *Myrmecaria opaciventris* Emery, *Paratrechina longicornis* (Latreille), *O. longinoda* et *O. smaragdina*

(Kenne et al., 2000, 2005) et la chasse solitaire est connue chez d'autres espèces de fourmis telles que *Camponotus* spp., *Polyrhachis* spp., *Platythyrea conradti* Emery, *Crematogaster* spp., *Solenopsis* spp., *Pachycondyla tarsatus* (Fabricius). L'action prédatrice des fourmis est un phénomène connu aussi bien dans la canopée des arbres (Floren et al., 2002 ; Dejean et al., 2007 ; Dejean, 2011) qu'au niveau du sol (Armbrecht and Gallego, 2007 ; Lange et al., 2008). La répulsion est un phénomène connu des fourmis pour éloigner les insectes et qui peut être lié soit à un signal chimique soit à un signal visuel. La communication chimique à base de phéromones est très fréquente chez les fourmis. Elle peut aussi servir d'un signal d'avertissement vis-à-vis des proies (Offenberg et al., 2004). La simple présence des phéromones émises par des fourmis peut ainsi être suffisante pour repousser les intrus. Ces substances chimiques sont sécrétées à partir de glandes endocrines logées soit dans la tête, soit dans les pattes ou au niveau de l'abdomen de l'insecte.

II.1.2 Le genre *Oecophylla* : un agent de lutte biologique efficace en horticulture

II.1.2.1 Ecologie du genre *Oecophylla* et potentiel de régulation des insectes nuisibles dans les vergers

Le genre *Oecophylla* regroupe deux espèces : *O. smaragdina* et *O. longinoda*. Ces deux espèces à l'écologie relativement similaire sont inféodées aux régions tropicales d'Australie et d'Asie du sud-est pour *O. smaragdina* (Leston, 1973 ; Hölldobler, 1983) et d'Afrique pour *O. longinoda* (Ledoux, 1949 ; Way, 1954) (Tableau 2). Toutes deux sont des espèces arboricoles. Elles sont caractérisées par une territorialité, une dominance sur plusieurs autres espèces et une aptitude à construire leurs nids dans le feuillage de la canopée (Hölldobler, 1977). Le nombre d'individus par colonie dépend de facteurs environnementaux biotiques tels que la disponibilité des ressources (habitats, ressources nutritives) et le niveau de perturbation de leurs habitats, mais aussi de facteurs abiotiques tels que la température et l'humidité relative. En Asie du sud-est, la taille des nids d'*O. smaragdina* varient de 4 000 à 6 000 individus par nid environ et la colonie entière peut atteindre 500 000 ouvrières constituant une centaine de nids répartis sur une quinzaine d'arbres (Van Mele and Cuc, 2007). En Afrique de l'Ouest, la taille moyenne des nids et des colonies est inférieure et elle dépend du type de la culture et du contexte climatique. Un verger héberge le plus souvent plusieurs colonies de fourmis oecophylles mais les nids appartenant à des colonies différentes ne cohabitent jamais sur le même arbre.

Le genre *Oecophylla* est remarquable par son agressivité envers d'autres insectes et intrus étrangers à la colonie. Ce trait de comportement contribue à ce qu'il soit l'un des genres de fourmis les plus efficaces en lutte biologique. Leur potentiel en tant qu'agents de lutte

biologique contre une large gamme d'insectes phytophages est important en milieu agricole (Dejean, 1991 ; Way and Khoo, 1992). Les deux espèces *O. smaragdina* et *O. longinoda* contrôlent respectivement plus de 50 et plus de 15 espèces de bioagresseurs appartenant à 18 familles d'insectes, sur huit cultures horticoles (Peng and Christian, 2010). Les agrumes, les manguiers et les anacardiers sont les fruitiers qui hébergent le plus fréquemment ces fourmis oecophylles. Le genre *Oecophylla* joue un rôle clé dans les programmes de lutte intégrée (IPM) contre les ravageurs des cultures fruitières en Australie (Peng and Christian, 2005 ; 2010). La présence de l'espèce *O. longinoda* dans les vergers en Afrique offre également la possibilité de développer des programmes de lutte intégrée contre les divers ravageurs des fruitiers, et en particulier contre les mouches des fruits (Tephritidae) qui constituent un ravageur d'importance économique en verger de manguiers.

Tableau 2: Pays africains où la présence d'*Oecophylla longinoda* a été signalée

Position géographique	Pays
Afrique de l'Ouest	Bénin, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Gambie, Ghana, Guinée Bissau, Guinée Conakry, Libéria, Mali, Nigéria, Sénégal, Sierra Leone, Togo
Afrique de l'Est	Burundi, Kenya, Ouganda, Rwanda, Tanzanie
Afrique Centrale	Cameroun, Gabon, Guinée Equatoriale, République Centrafricaine, République Démocratique du Congo
Afrique Australe	Afrique du Sud, Madagascar, Mozambique, Zambie

II.1.2.2 Importance et efficacité d'*O. smaragdina* et d'*O. longinoda* en tant qu'agents de lutte biologique en vergers et en plantations

***O. smaragdina* en Asie tropicale et en Australie**

La tradition d'utiliser des fourmis comme agents de lutte biologique contre les ravageurs de cultures est le plus ancien exemple de lutte biologique connu. Les Chinois furent les premiers à promouvoir la lutte contre les bioagresseurs des agrumes par dissémination des nids d'*O. smaragdina* dans leurs vergers il y a plus de 2000 ans (Huang and Yang, 1987). L'utilisation d'*O. smaragdina* dans les vergers du delta du Mekong au Vietnam permet de contrôler la mineuse *Phyllocnistis citrella* Stainton, l'acarien *Panonychus citri* (Mc Gregor), les pucerons *Toxoptera aurantii* (Boyer de Fonscolombe) et *T. citricidus* (Kirkaldy) ainsi qu'une large gamme d'autres insectes nuisibles aux agrumes (Huang and Yang, 1987), et a permis de baisser de moitié les applications des produits insecticides dans cette région (Van Mele and Cuc, 2000). L'utilisation de fourmis en lutte biologique dans des vergers d'agrumes en Asie et de manguiers en Australie constitue une activité très développée. Des études se sont d'ailleurs focalisées sur la recherche de conditions favorables au développement d'*O. smaragdina* dans les vergers (Van Mele and Van Chien, 2004 ; Offenberg and Wiwatwitaya, 2010).

***O. longinoda* en Afrique sub-saharienne**

En Afrique de l'Ouest, les recherches sur la question de l'efficacité d'*O. longinoda* contre les insectes ravageurs carpophages sont plus récentes et l'utilisation des fourmis en lutte biologique dans des vergers est encore peu développée. Au Bénin, les premières études ont commencé en 2005 en montrant l'action de prédation des oecophylles sur les larves de Tephritidae (Vayssières et al, 2006; 2013) et la réduction des pertes dues aux Tephritidae (Van Mele et al, 2007) dans les vergers de manguiers. Au Ghana, des tests d'efficacité d'*O. longinoda* contre les dégâts des mouches des fruits associées aux agrumes ont montré que la présence d'*O. longinoda* dans les vergers d'agrumes pouvait maintenir les niveaux de dégâts entre 6 et 10% (Ativor et al., 2012). L'espèce *O. longinoda* est abondante dans les vergers de manguiers du Bénin (Vayssières et al., 2011) et son rôle protecteur contre les mouches des fruits a été démontré en plantations de manguiers (Van Mele et al., 2007; 2009; Adandonon et al., 2009) où les taux de pertes peuvent chuter de 24% en présence des fourmis. En milieu paysan, bien que certains producteurs aient évoqué l'intérêt de la présence d'*O. longinoda* dans leurs vergers

(Sinzogan et al., 2008), l'aspect bénéfique de cette espèce dans les vergers reste largement méconnu par une grande partie des producteurs. Ils y sont néanmoins sensibilisés depuis plusieurs années afin de les inciter à préserver l'espèce dans les vergers et à préconiser leur usage comme une alternative aux pesticides (Van Mele and Vayssières, 2007a,b). La lutte biologique générée par les oecophylles africaines ne se limite pas aux bioagresseurs des manguiers (Tableau 3). Dans les plantations de cacaoyers, les dégâts des ravageurs comme *Salbergella singularis* (Hagl.), *Distantella theobroma* (Distant) et *Helopeltis* spp. peuvent être réduits de 60% (Van Wijngaarden et al., 2007). En plantations d'anacardiers, les dégâts occasionnés par *Helopeltis schoutedeni* Reuter, *Pseudotheraptus devastans* (Distant), *Anoplocnemis curvipes* Fabricius, *Helopeltis anacardii* Miller et *Pseudotheraptus wayi* (Brown) sur panicules florales ou nouvelles pousses du feuillage se limitent à environ 6% si *O. longinoda* est présent dans les vergers Ghanéens (Dwomoh et al., 2009). Des résultats similaires ont été enregistrés au Bénin avec les oecophylles vis-à-vis des Hémiptères Coreidae, Miridae de l'anacardier (Anato et al., 2015). En plantations de cocotiers, *P. devastans* et *P. wayi* sont aussi contrôlés par *O. longinoda*, améliorant la productivité de 2.7 à 4.1 noix supplémentaires par arbre en moyenne (Sporleder and Rapp, 1998).

Tableau 3 : Exemples de contrôle biologique effectué par *Oecophylla* spp. contre des insectes ravageurs de cultures

Agent de contrôle biologique	Culture	Bioagresseur(s) contrôlé(s)	Pays	Références
<i>Oecophylla smaragdina</i>	<i>Mangifera indica</i>	Curculionidae : <i>Sternochetus mangiferae</i>	Australie	(Peng and Christian, 2007)
<i>Oecophylla smaragdina</i>	<i>Citrus maxima</i> , <i>Citrus sinensis</i> , <i>Mangifera indica</i>	Cicadellidae : <i>Idioscopus clypealis</i>	Thaïlande	(Offenberg and Wiwatwitaya, 2013)

<i>Oecophylla smaragdina</i>		Thripidae : <i>Selenothrips rubrocinctus</i>	Australie	(Peng and Christian, 2004)
<i>Oecophylla longinoda</i>	<i>Mangifera indica</i>	Tephritidae: <i>Bactrocera invadens</i> , <i>Ceratitis cosyra</i>	Bénin	(Adandonon et al., 2009 ; Van Mele et al., 2009 ; Vayssières et al., 2013)
<i>Oecophylla longinoda</i>	<i>Mangifera indica</i>	Tephritidae: <i>Bactrocera invadens</i> , <i>Ceratitis</i> spp	Bénin	(Van Mele et al., 2007)
<i>Oecophylla longinoda</i>	<i>Theobroma cacao</i>	Miridae : <i>Salbergella singularis</i> , <i>Distantella theobroma</i> , <i>Helopeltis</i> spp	Ghana	(Van Wijngaarden et al., 2007)
<i>Oecophylla longinoda</i>	<i>Anacardium occidentale</i>	Miridae : <i>Helopeltis schoutedeni</i> , Coreidae: <i>Pseudothraupis devastans</i> , <i>Anoplocnemis curvipes</i>	Ghana	(Dwomoh et al., 2009)
<i>Oecophylla longinoda</i>	<i>Anacardium occidentale</i>	Miridae: <i>Helopeltis schoutedeni</i> , Coreidae: <i>Pseudothraupis devastans</i> , <i>Anoplocnemis curvipes</i>	Bénin	(Anato et al., 2015)

<i>Oecophylla longinoda</i>	<i>Anacardium occidentale</i>	Miridae: <i>Helopeltis anacardii</i> , <i>H. schoutedeni</i> , Coreidae: <i>Pseudotharrhaleus wayi</i>	Tanzanie	(Olotu et al., 2013)
<i>Oecophylla longinoda</i>	<i>Citrus</i> spp	Tephritidae: <i>Ceratitis ditissima</i>	Ghana	(Ativor et al., 2012)
<i>Oecophylla longinoda</i>	<i>Cocos nucifera</i>	Coreidae: <i>Pseudotharrhaleus devastans</i>	Côte d’Ivoire, Tanzanie	(Sporleder and Rapp, 1998 ; Allou et al., 2006; Vanderplank, 1960)

Mécanismes mis en œuvre par *O. longinoda* pour la lutte biologique contre les bioagresseurs

Les mécanismes par lesquels *O. longinoda* exerce une lutte biologique contre les insectes bioagresseurs sont de deux formes: directe par prédation des insectes ravageurs ou par neutralisation d’agents pathogènes avec les composés antibiotiques qu’elles transportent avec elles, et indirecte par un phénomène de répulsion. La prédation des insectes ravageurs s’exerce sur les arbres supportant les nids ainsi que sur les territoires « secondaires » habituellement situés sous les arbres au niveau du sol (Dejean, 1991). Cette capacité à éliminer tout intrus sur leur territoire rend *O. longinoda* mieux valorisable dans le cadre de la lutte biologique. Cette espèce de fourmi a, en effet, développé des stratégies efficaces pour chasser en groupe et capturer les insectes sur le feuillage des arbres, mais aussi sur le sol, au pied de l’arbre sur lequel elles nichent (Dejean, 1991; Hölldobler and Wilson, 1978; Wojtusiak et al., 1995). Le phénomène de répulsion s’exerce via un signal chimique et aussi probablement visuel qui éloigne le ravageur des territoires patrouillés par *O. longinoda*. Des recherches ont montré que les fourmis *O. longinoda* provoquent une réaction de répulsion contre les mouches des fruits responsables d’importantes pertes de production (Adandonon et al., 2009; Van Mele et al., 2009, Vayssières et al., 2013). Même si les mécanismes en jeu dans le phénomène de répulsion exercé par *O. longinoda* sont encore peu documentés, ils sembleraient néanmoins liés à des

signaux phéromonaux qui sont perçus par les insectes ravageurs. Des tests effectués au laboratoire ont montré que les mouches des fruits réduisaient considérablement la fréquence de leurs visites sur des fruits exposés aux fourmis oecophylles (Adandonon et al., 2009; Van Mele et al., 2009; Vayssières et al., 2013; Offenberg, 2014). L'action répulsive qu'exerce *O. longinoda* sur les ravageurs très mobiles comme les mouches des fruits est renforcée par l'hypothèse d'émission de phéromones chimiques perceptibles par ces dernières et auxquelles elles réagissent par une action d'éloignement (Offenberg, 2007) ou même par une modification de leur comportement de ponte en réduisant le temps mis pour le dépôt des œufs (Van Mele et al., 2007; 2009; Adandonon et al., 2009; Vayssières et al., 2013). Par conséquent, ce phénomène de répulsion limiterait les dégâts infligés par les mouches aux fruits des arbres occupés par les fourmis oecophylles.

II.1.2.3 Problématiques pour l'adoption du genre Oecophylla par les producteurs

Deux types de problèmes peuvent être posés par les fourmis oecophylles aux yeux des chercheurs et des producteurs: leurs interactions avec les homoptères Coccidae et leurs piqûres sur l'homme.

Interactions avec les homoptères Coccidae

Les homoptères sont souvent considérés comme des ravageurs de cultures ce qui n'est pas toujours exact. L'entretien des cochenilles et d'autres groupes d'homoptères par les oecophylles en plantations fruitières est finalement source de questionnement quant au rôle protecteur des fourmis oecophylles sur les arbres fruitiers. Après détermination des principales espèces d'homoptères Coccidae observés sur les feuilles, les flushs (les pousses en croissance) et les fruits de manguiers (protégés par les oecophylles) au Bénin, il est apparu que (i) la grande majorité sont des cochenilles sans impact négatif au niveau du manguiers, et que (ii) la pulpe de la mangue n'est jamais endommagée par les stylets de la cochenille (Vayssières, 2012). En plus, les espèces de cochenilles qui sont des ravageurs du manguiers, tel *Rastroccocus invadens* Williams, ne sont jamais ni véhiculées ni protégées par les oecophylles (Vayssières, 2012). Cependant, sur d'autres espèces fruitières, cela pourrait poser problème. C'est donc une problématique qui doit être étudiée avant de promouvoir les fourmis oecophylles comme agents de lutte biologique sur ces espèces fruitières, en particulier lorsque les homoptères (élevés par *O. longinoda*) et qui sont présents sur ces espèces fruitières sont aussi des vecteurs de virus. Selon Peng et Christian (2005), une manière efficace de se débarrasser du problème des homoptères peut être l'utilisation d'insecticides de basse toxicité comme le potassium ou les

huiles blanches qui sont capables de réduire les populations de ces insectes indésirables sans impacter sur les populations de fourmis. Il faut par contre éviter à tout prix les organophosphorés et les pyrethrinoïdes dans les vergers hébergeant des fourmis oecophylles (Van Mele and Cuc, 2007).

Les piquûres

Les morsures constituent souvent l'argument principal avancé par les producteurs ou intervenants pendant la récolte des fruits comme problème majeur occasionné par les fourmis oecophylles. Cependant, différentes attitudes sont adoptées par les populations pour réduire ces nuisances (Peng and Christian, 2010 ; Van Mele et al., 2009). La réduction des nuisances causées par les morsures est possible par l'adoption de procédés mécaniques d'évitement (longue perche pour la récolte, habillement adéquat avec bottes et gants de caoutchouc), de procédés mécaniques de répulsion (cendres appliquées sur les mains et les pieds, pulvérisation d'eau dans laquelle ont été trempées des feuilles de manioc, application d'une solution salée ou de jus de citron sur les parties exposées du corps), des interventions sur les arbres aux heures plus fraîches (très tôt le matin) ou aux heures plus chaudes (en milieu de journée) ou des procédés comportementaux (déplacements avec des mouvements lents en évitant de marcher sur leurs « rails »). Les procédés mécaniques d'évitement sont bien adoptés par certains planteurs d'Afrique de l'Ouest qui ont été sensibilisés et encadrés à travers, par exemple, des projets de recherche et de développement (Bénin, Burkina Faso, Guinée et Mali), ainsi que par certains planteurs en Asie (Thaïlande, Vietnam, Malaisie, Australie ou autres) (Van Mele et al., 2009). Cette problématique nécessite néanmoins des travaux de recherche supplémentaires pour favoriser l'adoption des fourmis oecophylles comme agents de lutte biologique dans les vergers, d'autant qu'aucune des pratiques utilisées par les producteurs n'a été évaluée scientifiquement jusqu'à aujourd'hui.

II.2 *Oecophylla* spp. et réseaux trophiques au sein des agroécosystèmes

II.2.1 Favoriser les fourmis oecophylles dans les agroécosystèmes

L'utilisation des fourmis en lutte biologique a gagné du terrain ces 10 dernières années en Afrique du fait de l'intensification des dégâts imputables aux mouches des fruits après l'arrivée de *B. dorsalis* dans la partie occidentale du continent. Les recherches et déroulements de programmes de lutte intégrée mettant en œuvre la fourmi *O. longinoda* au Bénin (Van Mele et al., 2007, 2009; Sinzogan et al., 2008; Vayssières et al., 2013 ; Ouagoussounon et al., 2013; 2015; Anato et al., 2015; Wargui et al., 2015 ; Vayssières et al., 2015), au Ghana (Dwomoh et

al., 2009; Ativor et al., 2012) et en Tanzanie (Seguni et al., 2011; Olotu et al., 2013 ; Abdulla et al., 2015) revêtent une grande importance du point de vue socio-économique pour les fermiers aux moyens souvent très limités.

La gestion d'une communauté entière de fourmis se révèle plus difficile que celle d'une seule espèce, raison pour laquelle beaucoup de programmes de lutte biologique adoptent l'approche pour une seule espèce de fourmi. Pourtant, l'avantage d'une approche pour une communauté entière de fourmis est que la complexité des interactions retrouvée dans la diversité des fourmis peut fournir plus de flexibilité pour combattre les bioagresseurs dans les cultures (Perfecto and Castiñeiras, 1998), mais cela dépend du type de culture, de la zone agroécologique, des fourmis impliquées etc.

Perfecto et Castiñeiras (1998) avaient signalé que des interactions potentiellement complexes entre espèces de fourmis pouvaient influencer l'efficacité de la lutte biologique dans les plantations. D'après Seguni et al. (2011) la compétition qui peut exister par exemple entre les espèces *O. longinoda* et *Pheidole megacephala* (Fabricius) pour l'occupation de la canopée peut réduire l'efficacité de la lutte biologique effectuée par *O. longinoda* sur *Pseudophtheraptus wayi* (Brown), ravageur du cocotier. Rapp et Salum (1995) ont démontré qu'il est possible de réduire cette compétition par des pratiques appropriées. Ils stipulent que le maintien des adventices dans les plantations de palmiers altère la compétition entre les deux espèces et augmente de plus du double le nombre d'arbres colonisés par *O. longinoda* en une année.

Ce type de gestion est à l'opposé d'une gestion du verger où généralement l'homme cherche à éradiquer un bioagresseur par l'utilisation de pesticides chimiques, une pratique se révélant néfaste car susceptible de provoquer: (i) l'élimination des agents de contrôle naturels par des effets léthaux et sub-léthaux, (ii) le déséquilibre des chaînes trophiques avec la pullulation d'espèces existantes de bioagresseurs, (iii) l'émergence et/ou la résistance des nouveaux biotypes et/ou espèces de bioagresseurs, (iv) la sélection ou la favorisation de groupes de fourmis dominants (Desneux et al., 2007). Les études de Kenne et al. (2003) ont d'ailleurs montré l'impact négatif de l'application des pesticides chimiques qui a conduit à sélectionner des espèces dominantes telles que *Myrmicaria opaciventris* Emery, *P. megacephala*, *Camponotus acpavimensis* Mayr et *Paratrechina longicornis* (Latreille) en plantations d'agrumes, de goyaviers et de manguiers au Cameroun. Or ces espèces élèvent très souvent des espèces d'Homoptères phytophages néfastes aux cultures (Kenne et al., 2003). Eviter une pareille situation suppose encore de reconsidérer l'importance des pratiques de gestion et de la conservation de la biodiversité végétale que les scientifiques interprètent comme un élément

fonctionnel important dans le verger, alors que très souvent les fermiers ne s'intéressent à la biodiversité que pour l'optimisation de l'utilisation des terres agricoles, i.e., association de cultures, ou les services qu'elle peut offrir comme l'ombrage ou brise vents pour les cultures (Van Mele and Chien, 2011).

II.2.2 Interactions avec les autres ennemis naturels

Dans les agroécosystèmes tropicaux, les fourmis jouent un rôle clé (Eubanks, 2001; Philpott and Armbrrecht, 2006) avec certaines espèces indigènes ou invasives atteignant fréquemment de fortes abondances et devenant écologiquement dominantes sur d'autres espèces de fourmis (Hölldobler and Wilson, 1990). Les espèces de fourmis dominantes peuvent réduire la richesse spécifique des ennemis naturels et la stabilité écologique du réseau trophique à cause de leur comportement agressif qui exclut ces espèces de leur territoire et de leur source de nourriture (Gibb and Hochuli, 2003). Les prédateurs omnivores et généralistes comme les fourmis oecophylles sont des compétiteurs capables de tolérer un bas niveau ou, jusqu'à un certain degré, une absence de proies, ce qui peut créer une compétition asymétrique pour la ressource. En plus de se nourrir de leurs proies habituelles, les prédateurs omnivores attaquent parfois leurs compétiteurs intraguildes i.e., comportement de prédation intragilde, ce qui renforce leur statut de compétiteur supérieur. C'est pourquoi la question des interactions entre les fourmis oecophylles et d'autres ennemis naturels des ravageurs des cultures est de nos jours au cœur des interrogations.

Lors d'une étude de l'impact d'*O. smaragdina* sur la biodiversité des insectes, Peng et Christian (2013) ont montré que des vergers de manguiers et d'anacardiés avec de fortes abondances de fourmis oecophylles avaient une diversité d'arthropodes et d'ennemis naturels similaire ou plus élevée et des ratios d'ennemis naturels/insectes ravageurs similaires comparés aux vergers sans fourmis oecophylles. Cependant, une espèce d'araignée (*Oxyopes* sp) était peu capturée dans les vergers d'anacardiés et de manguiers hébergeant de nombreuses fourmis oecophylles, suggérant que les oecophylles exercent une prédation ou une répulsion sur *Oxyopes* sp. Ils ont ensuite remarqué que la fourmi *O. smaragdina* et l'araignée *Oxyopes* sp avaient des niches écologiques très similaires et qu'en conséquence l'araignée subissait un fort niveau de compétition. De plus, une autre étude au laboratoire (Appiah et al., 2014), se focalisant sur l'interaction entre la fourmi *O. longinoda* et le parasitoïde *Fopius arisanus* (Sonan) (Hymenoptera: Braconidae) a démontré que *F. arisanus*, un parasitoïde de la mouche des fruits *B. dorsalis*, atteignait des taux de parasitisme sur *B. dorsalis* significativement plus élevés au

niveau des mangues non exposés à *O. longinoda* comparé aux mangues exposés à cette espèce. Concernant cette étude de cas, i.e., *B. dorsalis* et ces ennemis naturels, l'efficacité du parasitoïde indigène *F. arisanus* sur *B. dorsalis* est très faible (Vayssières et al., 2011, 2012). Si des résultats similaires devaient être observés dans les conditions naturelles (en vergers), cela pourrait devenir problématique dans un contexte de programme de lutte biologique classique, c'est-à-dire l'introduction du parasitoïde exotique *F. arisanus* dans le continent africain. Toutefois, en Afrique de l'Ouest et en conditions naturelles de vergers, des observations menées depuis 2005 au Bénin n'ont toujours pas identifié un comportement agressif d'*O. longinoda* vis-à-vis des parasitoïdes de Tephritidae (Vayssières et al., 2015). Il est aussi essentiel de remarquer que les effets négatifs des interactions intraguildes sur la lutte biologique ne sont généralement pas assez importants pour annuler les bénéfices liés à l'association de plusieurs ennemis naturels pour contrôler un ravageur (Jansen et al., 2006; Chailleux et al., 2013a; 2013b).

II.2.3 Interactions avec les pollinisateurs

Un autre groupe fonctionnel avec lequel les fourmis oecophylles peuvent négativement interférer est celui des pollinisateurs. Cependant, là non plus la situation n'est pas claire et cet effet potentiellement négatif n'a été exploré qu'assez récemment (Ohm and Miller, 2014 ; Assunção et al., 2014; Levan et al., 2014). En tant que prédateurs patrouillant sur tous les organes des arbres dont les fleurs, les fourmis oecophylles peuvent être suspectées d'exercer une prédation sur les pollinisateurs. En effet, les résultats obtenus par Tsuij et al. (2004) dans un verger de rambutans (litchi chevelu, *Nephelium lappaceum*) à Sumatra suggèrent que la présence des oecophylles abaisse significativement les taux de visites des fleurs par les insectes volant dont le pollinisateur majeur *Trigona Minangkabau* (Apidae: Meliponinae). Au contraire, Pierre et Idris (2013) ont observé que les fourmis oecophylles ne perturbaient pas le pollinisateur du palmier à huile *Elaeidobius kamerunicus* Faust (Coleoptera: Curculionidae) en Malaisie. Selon Rodríguez-Girones et al. (2013), bien que les fourmis ne soient normalement pas considérées comme des prédateurs d'insectes pratiquant la chasse à l'affut sur les fleurs (i.e. « flower-dwelling ambush predators »), cela devrait être reconsidéré, au moins sous les tropiques. Ils proposent donc les fourmis oecophylles (*O. smaragdina*) comme nouveau modèle pour étudier les prédateurs chassant à l'affut. Dans leur étude, ils ont observé que les fourmis oecophylles étaient présentes sur les fleurs et attaquaient les insectes visitant les fleurs de 31 des 48 espèces de plantes étudiées. De telles observations pour l'espèce *O. longinoda* sont en cours au Bénin, mais néanmoins, il a été déjà signalé que des fleurs présentes sur le continent

africain produisent des substances répulsives contre *O. longinoda* (Wilmer and Stone, 1997), ce qui suggère que *O. longinoda* est potentiellement un prédateur chassant à l'affut sur les fleurs, interférant avec la pollinisation.

Cependant, la complexité des interactions entre espèces est si importante que les effets qui au premier abord apparaissent négatifs, peuvent s'avérer positifs en fin de compte. Par exemple, *O. smaragdina* est connu pour exercer une prédation sur la guêpe pollinisatrice des figuiers (*Ficus* spp.). En étudiant plus en détail l'impact des oecophylles sur ce mutualisme, Schatz et al. (2006) ont suggéré qu'elles pourraient finalement avoir un effet positif sur la pollinisation car elles ont un effet de dissuasion sur les guêpes parasites qui pourrait compenser leur effet a priori négatif sur les guêpes pollinisatrices. En effet, les guêpes pollinisatrices semblent bénéficier de la prédation des fourmis oecophylles sur les guêpes parasites. Un autre exemple est l'étude de cas de González et al. (2013) montrant que la présence des fourmis oecophylles sur *Melastoma malabathricum* Linnaeus (Melastomataceae) était associée à une augmentation de la reproduction des fleurs car elles tendent à chasser les pollinisateurs les moins efficaces favorisant ainsi la présence des plus efficaces.

En ce qui concerne les agroécosystèmes fruitiers, la question est de savoir si l'on peut trouver un compromis satisfaisant entre les bénéfices de la présence des fourmis oecophylles (prédation sur les ravageurs) et leur effet négatif sur la pollinisation. Le fait est qu'il est très difficile de prédire (i) l'effet des fourmis oecophylles sur les pollinisateurs des arbres fruitiers et (ii) l'impact de la baisse de l'accès des pollinisateurs aux fleurs sur le rendement de l'arbre. En effet, très peu de données sont disponibles sur la pollinisation des arbres fruitiers en milieu tropical. Néanmoins, le manguier (Dag and Gazit, 2000), l'anacardier (Freitas and Paxton, 1996) et les agrumes (Sanford, 2010) sont principalement dépendants d'une pollinisation entomophile. Cependant très peu d'études sont menées dans le continent africain (Rodger et al., 2004). Par conséquent, l'impact des fourmis *O. longinoda* sur la pollinisation des arbres fruitiers dans les vergers africains, lorsque elles sont utilisées comme agent de lutte biologique, doit être davantage étudié, comme c'est le cas actuellement au Bénin (Anato et al., 2015).

II.3 Autres rôles fonctionnels des fourmis dans les agroécosystèmes

II.3.1 Agents pollinisateurs

Les fleurs des plantes entomophiles peuvent être visitées par une variété d'insectes dont l'aptitude à polliniser des fleurs varie considérablement en termes de qualité et de quantité (Herrera, 1987, 1989). Certains groupes d'insectes tels que les fourmis ont été

traditionnellement considérés comme des pollinisateurs inefficaces, même si quelques espèces sont des visiteurs de fleurs (Garcia et al., 1995). Les raisons qui font que les fourmis sont considérées comme des pollinisateurs peu efficaces sont leur taille qui est relativement petite comparée à d'autres insectes pollinisateurs, leur tégument qui est lisse, leur aptitude à se nettoyer régulièrement le corps ou leurs sécrétions d'antibiotiques (contre les microorganismes pathogènes) dont la coévolution avec le pollen est souvent incompatible (Beattie et al., 1984). La structure de certaines fleurs a d'ailleurs été interprétée comme une adaptation pour prévenir la visite des fourmis (Peakall et al., 1987) comme présenté précédemment (section I.2.3). Une autre raison évoquée est leur effet négligeable sur le flux de pollen puisqu'il leur faut beaucoup de temps pour passer d'une plante à une autre en tant qu'insecte aptère, par rapport à des insectes volants. Le pouvoir pollinisateur des espèces de fourmis est considéré comme étant faible, mais cette appréciation est relative à l'existence d'autres pollinisateurs beaucoup plus efficaces et habiles tels que les abeilles, les papillons et les guêpes. Néanmoins, les patrouilles effectuées par les fourmis sur les fleurs leur procurent un statut de pollinisateurs accidentels non négligeables (Regupathy and Ayyasamy, 2011). Philpott et al. (2006) n'ont pas observé de différence sur le nombre et le poids de cerises de café (*Coffea arabica*) entre des arbres dont la pollinisation a été assurée par des insectes volants (abeilles, guêpes, papillons) ou par des fourmis. Une récente étude (De Vega and Herrera, 2013) a mis en évidence des modifications chimiques sur les sucres des nectars floraux après leur contact avec les levures transportées par les fourmis. Ces fleurs, en fonction des quantités de levures déposées, contiennent plus de fructose, plus de glucose et moins de sucrose et enregistrent une légère hausse de température par rapport aux fleurs non visitées par les fourmis. Ce phénomène aurait comme conséquence la réduction du contrôle chimique de la plante sur les composés floraux. La capacité de telles fleurs à être pollinisées est souvent modifiée car la hausse de température générée (de l'ordre de 5-6°C) et les nouvelles molécules de sucres produites attireraient beaucoup plus de pollinisateurs comme les abeilles (Whitney et al., 2008). Les interactions entre les levures transportées par les fourmis, les fleurs et les pollinisateurs ont cependant besoin d'être explorées davantage afin de mieux comprendre toutes les conséquences écologiques qui accompagnent ces processus.

II.3.2 Agents bioturbateurs ou « ingénieurs des écosystèmes » ?

La structure du sol dans les écosystèmes peut être affectée par une partie de la composante biotique animale, la pédofaune notamment. Parmi les organismes de la pédofaune ayant un rôle dans la structuration du sol, les vers de terre, les termites et les fourmis sont les plus

remarquables du point de vue de la quantité de sol qu'ils déplacent et des structures biogéniques ou agrégats organo-minéraux (terricules, galeries, dômes) qu'ils génèrent (Jones et al., 1994 ; Lavelle, 1997). Après les vers de terre, les fourmis sont les organismes de la pédofaune déplaçant le plus de sol (Decaëns et al., 2001). Les galeries mises en place par les fourmis lors de la construction des nids favorisent l'aération du sol. Certains de ces types de sol peuvent être issus d'horizons relativement profonds et sont souvent moins riches en matières organiques que certains agrégats fabriqués par des vers de terre et des termites (Decaëns et al., 2001). Les fourmis jouent un rôle non négligeable sur la dynamique de la matière organique, l'accélération de sa minéralisation et les propriétés physiques du sol, en particulier sa porosité qui influence l'infiltration et la circulation de l'eau et réduit les risques potentiels d'érosion (Lavelle, 1997 ; Warren II and Bradford, 1997). Ainsi, à travers ces effets, les fourmis améliorent la qualité minérale du sol notamment grâce à la dissolution d'éléments minéraux comme l'azote, le phosphore ou le potassium (Folgarait, 1998 ; Wagner et al., 1997 ; Lane and BassiriRad, 2005 ; Frouz and Jilková, 2008 ; Dorn 2014) et améliorent la disponibilité des ressources (eau, sédiments, éléments nutritifs) pour les microorganismes et les plantes (Folgarait, 1998 ; Jouquet et al., 2006 ; Cammeraat and Risch, 2008). Ces conclusions mettent l'accent sur l'importance de l'activité des fourmis dans les écosystèmes et en particulier les paysages agricoles dans lesquels la durabilité de la production passe par une stabilité des processus écologiques liés à la qualité du sol.

II.3.3 Agents contribuant à la conservation de la biodiversité animale et végétale dans les écosystèmes

Dans la mesure où elles peuvent être les proies d'autres prédateurs, les fourmis constituent un maillon important des chaînes alimentaires dans les écosystèmes. Leurs principaux prédateurs sont d'autres insectes de la famille des Calliphoridae, Carabidae, Chalcididae, Eucharitidae, Formicidae, Cyclotornidae, Pyraloïdae, Oecophoridae, Tineidae, Myrmeleontidae, Phoridae, Reduviidae, Rhagionidae, Staphylinidae, etc (Schultz and McGlynn, 2000) mais aussi des arachnides, des vertébrés comme les Amphibiens, les Reptiles (lacertiliens, ophidiens), les oiseaux (Bequaert, 1922 ; Weber, 1972) et même des mammifères (Bogart and Pruetz, 2005). En milieu désertique par exemple, les fourmis constituent une part importante du régime alimentaire de beaucoup de reptiles (Whitford and Bryant, 1979 ; Rising, 1981), d'oiseaux (Campos-Chaves, 2011) ou de mammifères (Redford, 1987) et contribuent positivement au maintien et au bon fonctionnement des réseaux trophiques et de la biodiversité dans ces écosystèmes.

Les fourmis jouent un rôle important dans la dissémination des graines. Ainsi, on estime que ce phénomène profite à plus de trois mille espèces végétales, essentiellement en Afrique et en Australie (Keller and Gordon, 2006). Les fourmis jouent également un rôle positif dans l'enfouissement des graines dans le sol en synergie avec son ameublissement. Par leur capacité de dissémination des graines, elles permettent par exemple de réduire la compétition pour l'espace entre végétaux (Seidler and Plotkin, 2006).

III. Utilisation des fourmis comme bio-indicateurs

L'utilisation d'insectes comme bio-indicateurs: Carabidae (Rainio and Niemelä, 2003; Avgin and Luff, 2010); Araneidae (Maelfait and Hendrickx, 1998); Syrphidae (Sommaggio and Burgio, 2014) est connue. D'après Oliver et Beattie (1996), un taxon doit satisfaire jusqu'à quatre principaux critères pour porter le qualificatif d'un bon bio-indicateur: (1) être facilement échantillonnable, (2) représenter un groupe suffisamment diversifié ou d'importance biologique, (3) avoir des relations avec la diversité des autres taxons (animaux et végétaux), et (4) être sensible aux changements environnementaux. Les fourmis constituent un candidat idéal en tant que groupe bio-indicateur du fait de sa grande diversité, sa forte présence dans presque tous les habitats et la facilité des espèces à être collectées (Majer, 1983). Elles offrent d'autres avantages liés à leur relative stabilité dans leurs déplacements comparés à d'autres insectes, leur importance écologique en tant que prédateurs, proies, détritivores, mutualistes et herbivores. Les relations étroites qu'elles entretiennent avec leur environnement les rendent cependant sensibles aux variations/perturbations de ce dernier (Majer, 1983 ; Alonso, 2000). Dans le cadre de diagnostics d'écosystèmes, les communautés de fourmis ont fait preuve d'outils privilégiés de recherches de l'état d'équilibre de milieux en constants changements. Ce type d'études a connu un grand succès en Australie (Andersen et al., 2002; Andersen et al., 2004), en Amérique du Nord et en Afrique australe (Andersen and Majer, 2004). Les niveaux de résilience d'anciens sites miniers ont été étudiés en utilisant les fourmis en Australie (Majer, 1983 ; Majer and Nichols, 1998), en Italie (Ottonetti et al., 2006) et ailleurs dans le monde (Fagan et al., 2010 ; Ribas et al., 2011 ; Gollan et al., 2011). Leur utilisation dans l'évaluation de la gestion des sols et des écosystèmes est un atout majeur (Andersen et al., 2002 ; Andersen et al., 2004). Plus récemment, leur utilisation lors d'études menées dans environnements agricoles variés connaît une évolution: elles y sont considérées comme des indicateurs de changements liés aux pratiques agricoles (Kumar and Mishra, 2008 ; Torchote et al., 2010 ; Yeo et al., 2011), des indicateurs de l'état des sols (Bestelmeyer and Wiens, 2001 ; Ríos-Casanova et al., 2006 ;

Bernadou et al., 2013) et des indicateurs de biodiversités animale (Underwood et al., 2006 ; Kwon et al., 2014) et végétale (Leal et al., 2012).

IV. Conclusion du chapitre 2

La bio-écologie et les différents rôles des fourmis qui ont été présentés dans ce chapitre permettent de retenir deux points essentiellement intéressants quant à leurs fonctionnalités dans les agroécosystèmes fruitiers.

- (1) La notion de lutte biologique par les fourmis connue depuis longtemps est explicitée dans cette partie à travers le genre *Oecophylla* particulièrement présent dans les régions tropicales du globe. Cette synthèse des connaissances a montré néanmoins que leur efficacité en lutte biologique n'était jusque-là pas démontrée en zone soudano-sahélienne relativement plus chaude et sèche comparée au milieu tropical humide. Une étude sur la capacité d'une telle espèce à exercer une lutte biologique en milieu soudano-sahélien se révèle donc intéressante. L'étude du système « *Oecophylla longinoda* - *Bactrocera dorsalis* » et des relations entre les caractéristiques du verger et l'abondance de ces deux insectes constitueront une partie du chapitre 3.
- (2) La notion d'utilisation des fourmis comme bio-indicateurs dans diverses situations a été aussi abordée dans ce chapitre. La même remarque peut être faite par rapport à d'autres zones géographiques du globe où des études apparentées ont été effectuées. En effet, l'utilisation des fourmis comme bio-indicateurs a été plus développée en milieu tempéré et dans des zones avec des activités minières anciennes. En milieu soudano-sahélien et encore moins en agroécosystèmes fruitiers, aucune étude n'a été entreprise sur les communautés de fourmis comme bio-indicateurs. Dans ces milieux où il n'existe pas de bio-indicateurs reconnus, l'étude des relations entre les caractéristiques du verger et les communautés de fourmis se révèle particulièrement intéressante. L'étude des relations entre la biodiversité des fourmis et les caractéristiques du verger sera aussi choisie dans le chapitre 3 pour aborder cette question.

***CHAPITRE 3 : Relations entre les caractéristiques du verger, les
fourmis et les mouches des fruits***

Chapitre 3 : RELATIONS ENTRE LES CARACTERISTIQUES DU VERGER, LES FOURMIS ET LES MOUCHES DES FRUITS

I. LES INTERACTIONS ENTRE LES CARACTERISTIQUES DU VERGER, LA FOURMI *Oecophylla longinoda* ET LA MOUCHE DES FRUITS *Bactrocera dorsalis*

Article 1

Influence of *Oecophylla longinoda* Latreille, 1802 (Hymenoptera: Formicidae) on mango infestation by *Bactrocera dorsalis* (Hendel), 1912 (Diptera: Tephritidae) in relation to Senegalese orchard design and management practices

Lamine DIAME^{2,4*}, Isabelle GRECHI⁵, Jean-Yves REY^{1,2}, Cheikh Amet Bassirou SANE^{2,4}, Paterne DIATTA^{2,4}, Jean-François VAYSSIERES^{1,3}, Ardachir YASMINE^{2,4}, Hubert DE BON¹, Karamoko DIARRA⁴

Manuscrit soumis à *African Entomology* le 26/06/2014

Accepté le (23/04/2015)

I.1 Résumé

Les dégâts causés par la mouche des fruits *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (syn. *B. invadens* Drew, Tsuruta & White) (Diptera : Tephritidae) sur les mangues au Sénégal provoquent des pertes de production. Un agent de lutte biologique potentiel contre ce bio-agresseur est la fourmi oecophylle *Oecophylla longinoda*. Les vergers de manguiers sénégalais présentent une diversité de pratiques de conception et d'entretien pouvant influencer les abondances de ces deux espèces dans les vergers. Dans cette étude nous avons évalué i) l'efficacité d'*O. longinoda* à limiter les dégâts de *B. dorsalis* dans les vergers sénégalais, et ii) les variations d'abondances de ces deux insectes selon les modèles de conception et d'entretien de ces vergers. L'étude a été conduite au Sénégal dans la zone des Niayes et le plateau de Thiès. Quinze vergers ont été échantillonnés parmi trois types de vergers préalablement identifiés dans cette zone : (1) « Vergers de manguiers diversifiés sans intrants » ; (3) « Vergers à *Citrus* prédominants avec niveau

intermédiaire d'intrants » ; (4) « Grands vergers de manguiers ou de *Citrus* prédominants avec niveau intermédiaire d'intrants ». Sur un des vergers nous avons mesuré le taux d'infestation et le nombre de pupes dans des mangues collectées sur des arbres (cv. Kent) 'avec' et 'sans' colonies d'*O. longinoda*, à trois dates de la campagne de production (mai, juillet et août) en 2013. Des mesures d'abondances d'*O. longinoda* et de *B. dorsalis* ont été effectuées pendant deux mois en saison sèche et deux mois en saison humide dans les 15 vergers en 2012. La présence d'*O. longinoda* dans les arbres réduisaient aussi bien la proportion de mangues piquées par *B. dorsalis* que le nombre de pupes dans les mangues infestées. L'abondance d'*O. longinoda* et de *B. dorsalis* étaient négativement corrélées. Ces abondances variaient selon le modèle de conception et d'entretien des vergers. L'abondance d'*O. longinoda* était plus élevée dans les vergers de type 1 et 3 que dans ceux de type 4. A l'inverse, l'abondance de *B. dorsalis* en saison humide tendait à être plus élevée dans les vergers de type 4 que dans ceux de type 1 et 3. Cette étude a montré la capacité de la fourmi *O. longinoda* à limiter les infestations des mangues par *B. dorsalis*. Elle a aussi montré que l'abondance de ces deux espèces est influencée par les pratiques de conception et d'entretien des vergers. Par conséquent, une lutte contre les mouches des fruits par les fourmis oecophylles est possible dans les vergers sénégalais en adoptant des pratiques favorisant la préservation des oecophylles.

Mots clés: lutte biologique, fourmis oecophylles, mouches des fruits, *Bactrocera invadens*, agroécologie, pratiques agricoles

I.2 Abstract

Damage caused by the fruit fly *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (syn. *B. invadens* Drew, Tsuruta & White) (Diptera: Tephritidae) on mangoes in Senegal leads to production losses. A potential biological control agent against this pest is the weaver ant *Oecophylla longinoda* Latreille (Hymenoptera: Formicidae). Senegalese mango-based orchards present a diversity in design and management practices that can influence the abundance of these two species in orchards. In this study we evaluated i) the ability of the *O. longinoda* ant to limit *B. dorsalis* damage in Senegalese orchards, and ii) variations in population abundance for these two species depending on orchard design and management practices. The study was conducted in Senegal in the Niayes area and the Thiès plateau. Fifteen orchards were sampled among three out of four kinds of orchards identified in this area: (1) 'No-input mango diversified orchards', (3) 'Medium-input citrus-predominant orchards' and (4) 'Medium-input large mango- or citrus-predominant

orchards'. In one of the orchards we measured infestation rates and numbers of fly pupae that developed from mangoes collected from trees (cv. Kent) "with" and "without" *O. longinoda* colonies over three harvesting periods (May, July and August) in 2013. The abundance of *O. longinoda* and *B. dorsalis* was measured for two months in the dry season and two others in the rainy season in the fifteen orchards in 2012. The presence of *O. longinoda* on trees reduced the proportion of mangoes attacked by *B. dorsalis* as well as the number of pupae developed from infested mangoes. The abundance of *O. longinoda* and *B. dorsalis* was negatively correlated. The abundance varied depending on the orchard design and management practices. *O. longinoda* abundance was greater in orchard types 1 and 3 than in type 4. Conversely, *B. dorsalis* abundance in the rainy season tended to be greater in orchard type 4 than in types 1 and 3. This study showed the *O. longinoda* ant to be effective in limiting mango infestations by *B. dorsalis*. It also showed that the abundance of these two species was influenced by the orchard design and management practices. Therefore, using *O. longinoda* ant to control fruit flies is possible in Senegalese mango-based orchards by promoting weaver ant preservation.

Key words: Biological control, weaver ants, fruit flies, *Bactrocera invadens*, agroecology, farming practices

I.3 Introduction

Fruit production accounts for a large share of the Senegalese agricultural sector. Fruits are essentially intended for the local market (Touré & Fall 2001) but they are gaining an increasingly large share of the export market, with a very favourable niche for mango (Infoconseil 2006). The latter takes first place in terms of the agricultural tonnage of exported products (Rey & Dia 2010). In 2004, the presence of a new invasive fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (syn. *B. invadens* Drew, Tsuruta & White; Schutze et al. 2014a,b) (Tephritidae: Diptera) was signalled in Senegal (Vayssières, 2004). *B. dorsalis* causes substantial damage on mango, mostly during the fruit maturation period, when flies lay their eggs on ripe fruits (Ndiaye et al. 2012). *B. dorsalis* can also lay on green fruits and develop on fallen fruits and green, unripe fruits (Diatta et al. 2013). It also attacks many other fruit species belonging to numerous botanical families, which allows it to increase its multiplication potential (Vayssières et al. 2011).

In West Africa, the economic importance of the damages caused by *B. dorsalis* fruit fly is growing and all segments of the mango value chain suffer from this issue. In Senegalese orchards, fruit damages imputable to fruit flies were estimated to 30-50% in the Niayes area

and 60% in the Casamance (Ternoy *et al.* 2006; Ndiaye *et al.* 2012). After a few days, infested fruits are inedible and must be discarded. Fly damages in home garden mango trees as well as in small-scale mango orchards impact food security at the local scale since mangoes provide a fundamental nutritional intake for rural populations. This also cause heavy financial losses to the various stakeholders of the mango sector, including the producers who cannot sell these fruits but also all those who commercialize mangoes in local, national and sub-regional markets (wholesalers, retailers) or processing industries that can unwittingly purchase batch of infested fruits because mangoes recently infested are hardly detectable by inexperienced people. So, the financial losses of the traders have been particularly important in the first years that followed the arrival of *B. dorsalis*. The export mango market is deeply affected by this issue as well since *B. dorsalis* is classified as a quarantine pest in most importing countries (EPPO A1 List 2013). If a single infested fruit is detected by the phytosanitary services on arrival, the whole batch is rejected and destroyed. Even worse, the exporting country may be embargoed if too many batches were found to contain fruit flies.

Of the methods used to control fruit flies, pesticide applications are the first choice of farmers. However, pesticide use is not an optimum solution. Apart from the high prices for Senegalese farmers of the chemical products currently available, their use entails a variety of negative effects: i) a health hazard for producers and consumers, ii) a harmful effect to natural enemies (Devine & Furlong 2007), iii) a lack of recommendable active ingredients for use in fruit cultivation apart from Success Appat (0.24 g/L of spinosad-based insecticide), iv) a phenomenon of fruit fly resistance to spinosad appearing, such as the one appearing in the *B. dorsalis* complex group (Hsu & Feng 2006; Jing *et al.* 2010), v) an ineffectiveness of fruit fly treatments against immature stages (eggs, larvae, pupae). In addition, consumers and importers are increasingly aware of the problems of pesticide residues and sanitary quality of fresh fruits and vegetables. Checks of products compliance to Maximum Residue Limits (MRL) have become particularly strict at the entrance to the European Union, the main export market for Senegalese mangoes. Some certifications even impose MRL below the official MRL and some large purchasing groups even refer to the ARfD (Acute Reference Dose) (FAO/WHO, 1998; 2000) of a chemical, which for fruits of mango size is equivalent to reduce the MRL by about two and a half.

There are other alternative methods to pesticide use that are more environment-friendly in controlling crop pests. Biological control, which focuses on using natural enemies, is one such method. The weaver ant *Oecophylla longinoda* (Latreille) (Hymenoptera: Formicidae) is a biological control agent against various insect pests (Dejean 1991; Way & Khoo 1992).

Published records indicate that weaver ants were recognised in China as a biological control agent as early as 304 A.D (Huang & Yang 1987; Van Mele & Cuc 2007). Their predation strategy against insects is effective due to the large number of workers per colony (Hölldobler & Wilson 1978). Recent research has demonstrated their effectiveness in controlling several pests in Beninese mango plantations where the average damage ranged from 1 to 24% when *O. longinoda* weaver ants were either abundant or absent (Van Mele *et al.* 2007; Vayssières *et al.* 2010), in Ghanaian cashew plantations where trees colonized by *O. longinoda* had less than 6% pest damage to shoots, panicles and fruits (Dmowoh *et al.* 2009), in Ghanaian *Citrus* plantations where trees colonized by *O. longinoda* had between 6% and 10% fly infestation (Ativor *et al.* 2012) and in Tanzanian cashew plantations where shoot damaged by *Heltopeltis* spp and nut damaged by *Pseudopterus wayi* were reduced on average to more than 22% and 14% respectively in trees colonised by *O. longinoda* (Olotu *et al.* 2013).

In addition to reducing fruit fly infestations, *O. longinoda* ants may improve the organoleptic quality of the fruits of the tree they colonize (Sinzogan *et al.* 2008). However, to be potentially effective in controlling insect pests, weaver ant populations in an orchard have to reach a critical level (Lim 2007; Van Mele & Cuc 2007). For example, a minimum of 25 *O. smaragdina* colonies per hectare were necessary for *Hypsipyla robusta* (Lepidoptera: Pyralidae) pest control in Malaysian cashew plantations (Lim 2007).

Senegalese fruit-based agroecosystems present differences in their orchard designs and management practices. There are great variations in natural plant diversity and the plants grown, hedges around the orchards and management practices (*e.g.* irrigation, fertilization, phytosanitary practices...). The abundance of pests and natural enemies is likely to be affected by orchard design and management practices. Predators, parasitoids, as well as pollinators, are recognized as beneficial insects in cropping systems. They find their food, shelter and reproduction sites in resources offered by plants, and interact with plant diversity at various scales (Landis *et al.* 2005). The structural complexity (or simplification) of the landscape, and the intensity of farming practices, are known for having effects on biotic interrelations between species (Anderson *et al.* 2013) and can affect the abundance levels of natural enemies (predators, parasitoids) but also of crop pests (phytophagous) (Langello & Denno 2004; Morgossian *et al.* 2009). Structurally complex agricultural landscapes with management based on biological methods are favourable to an increase in natural enemy populations (Östman *et al.* 2001; Öberg 2009; Simon *et al.* 2009).

In this study the aim was: i) to estimate *Oecophylla longinoda* ant effectiveness as a biological control agent to regulate mango infestations by *Bactrocera dorsalis* in Senegalese orchards, ii)

to evaluate variations in the abundance of these two species depending on orchard design and management practices.

I.4 Material and Methods

I.4.1 Study area and orchard sampling

This study was carried out in the Niayes area and the Thiès plateau, in western Senegal (Figure 3.1). These regions are characterized by ferralic arenosols and a Sahelian climate with unimodal rainfall from July to September (between 600 mm and 750 mm per year between 2008 and 2012). The favourable climate mitigated by a cool and humid trade wind during the hot season makes these two regions the major fruit and vegetable production areas of Senegal.

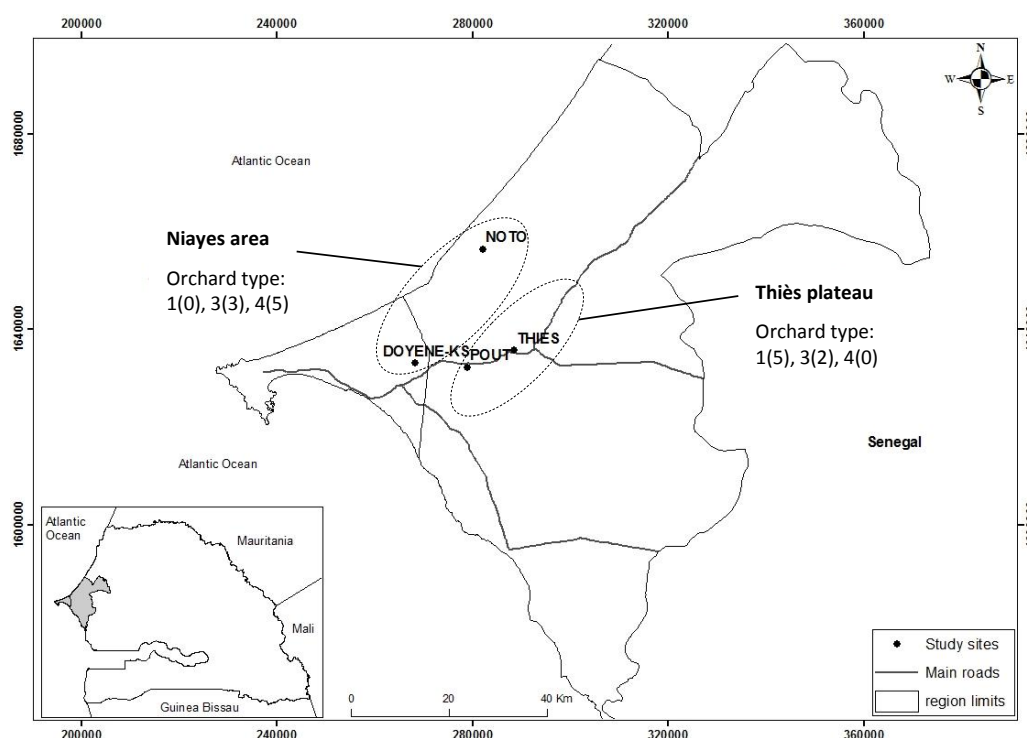


Figure 2: Map of the study area in the Niayes and Thiès plateau zones, in Senegal. The number of orchards in each zone and per orchard type is indicated between brackets. Orchard type: (1) “No-input mango diversified orchards”, (3) “Medium-input citrus-predominant orchards” and (4) “Medium-input large mango- or citrus predominant orchards”

In the Niayes area and the Thiès plateau, four orchard types were identified: (1) ‘No-input mango diversified orchards’, (2) ‘Low-input mango orchards’, (3) ‘Medium-input citrus-predominant orchards’ and (4) ‘Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards’ (Grechi *et al.* 2013). This typology was established according to orchard design arrangements (area, planting density, fruit species, and mango tree cultivars) and management practices (irrigation, fertilization, phytosanitary practices, soil management, and secondary use of the

orchard). Types 1 and 2 consisted of orchards with a high composition of mango trees (86% on average), and a high diversity in mango cultivars for those of type 1. They were mostly planted with polyembryonic mango cultivars, such as cv Boucodiékhil, and were dedicated to the local market or subsistence production. None of orchards of type 1 was managed or supplied with water, fertilizers and pesticides. Orchards of type 2 displayed only low management levels. Vegetation in orchards of type 1 was dense. Type 3 consisted of orchards with a high composition of citrus trees (65% on average), including grapefruit, orange and mandarin species, and a high species diversity. Planting density was high on average but tree spacing was irregular within the orchards. All orchards were irrigated and fertilized. Type 4 consisted of large orchards with a low diversity of species and mango cultivars and regular tree spacing. Kent was the main cultivar followed by cv. Keitt. Most of them were mango mono-specific orchards whereas the others were citrus-predominant mixed orchards. They displayed the highest management levels in comparison with those of the others types. Mango mono-specific orchards of type 4 were rather dedicated to the export market.

Fifteen orchards were sampled in types 1, 3 and 4 at a rate of five orchards per type (Table 4). Eight orchards were located in the Niayes area and seven on Thiès plateau (Figure 2).

Table 4: Locations of the 15 orchards studied for monitoring *Bactrocera dorsalis* and *Oecophylla longinoda* abundance in the Niayes area and the Thiès Plateau, in Senegal

Geographical zone	Orchard type	Latitude (N)	Longitude (W)
Niayes zone	4	14°58'18.4''	17°01'28.1''
	4	14°59'03.6''	17°00'16.4''
	4	14°59'19.8''	17°00'13.7''
	4	14°58'20.1''	17°00'07.9''
	4	14°58'11.0''	17°00'11.5''
	3	14°45'45.9''	17°09'08.8''
	3	14°45'39.1''	17°08'54.3''
	3	14°45'41.5''	17°08'47.3''
Thiès plateau	3	14°45'27.1''	17°03'03.5''
	1	14°45'49.2''	17°02'49.9''
	1	14°45'42.1''	17°02'46.7''
	1	14°45'30.9''	16°52'58.3''
	1	14°45'26.2''	16°52'59.7''
	1	14°47'22.8''	16°57'55.7''
	3	14°45'41.5''	17°08'47.3''

I.4.2 Data collection

I.4.2.1 Fruit infestation monitoring on mango trees with and without weaver ant colonies

The ability of *O. longinoda* to reduce *B. dorsalis* damage on mango was studied in one of the fifteen orchards in 2013, over three periods (May, July and August). The orchard was a mango orchard (cv Kent). For each time period, we harvested 200 mangoes (25 mangoes per tree) from four mango trees “with” a weaver ant colony and four other mango trees “without” a weaver ant colony. Fruits were kept separately in cages. A week later, attacked fruits were identified and counted to determine the mango infestation rate for each tree. Attacked fruits from the same tree were placed on a mesh support mounted over basins and incubated. The bottom of the basins was covered with wet sand, onto which larvae emerging from the fruits could drop and develop into pupae. Once a week, we sieved the sand of each container and recorded the number of pupae.

I.4.2.2 Monitoring of weaver ant and fly abundance

The abundance of weaver ants and flies was monitored in the fifteen orchards in 2012. The weaver ant abundance survey was carried out using the branch method developed by Peng and Christian (2004). Twenty trees (mango or *Citrus* trees) chosen at random were surveyed per orchard. On each tree, observations were carried out on all the main branches situated within reach of the observer with arms held high (~2.40m). The main branches are those directly branching from the tree trunk but also those branching from the latter. They vary in number from three to ten depending on the trees. This method consisted of counting the number of weaver ants moving on each main branch of the tree, which was used to determine, for each branch, an ant abundance score according to the following scale: 0, no ants; 0.5, one to 10 ants and 1, more than 10 ants. The survey was carried out every two weeks over a period of four months in the dry season (from 31 March to 26 June 2012) and in the rainy season (from 23 July to 6 September 2012). Data were collected after 9.30 am because the most active period for weaver ants is 9.30 am to 6.30 pm (Vayssières *et al.* 2011). The weaver ant abundance on each tree was determined on each survey date and corresponded to the average scores obtained for its main branches. As the ant abundance on trees was constant enough for the different survey dates of the same season (unpublished), an average abundance per orchard and per season was calculated.

B. dorsalis abundance monitoring was also carried out throughout the study by using sexual parapheromone bait. Three Tephri traps were installed in each orchard. The Tephri traps comprised plastic pots containing methyl-eugenol, a sexual attractant especially attracting *B. dorsalis* male fruit flies, and an insecticide which kills them. The traps were suspended from branches in the lower third of the foliage. The central coil of wire holding the trap was coated with thick grease in order to prevent any predatory activity by weaver ants (*O. longinoda*) on dead adult flies in the bottom of the trap (Vayssières *et al.* 2009). Trapped flies were taken from the traps and counted each week and the parapheromone cylinders and insecticide were changed every month. In each orchard, we calculated the average weekly number of trapped flies per trap. *B. dorsalis* fly abundance per orchard and per season was then calculated taking the sum of weekly orchard averages on the survey dates between 10 April and 9 June 2012 (dry season; 60 days) and between 19 July and 17 September 2012 (rainy season; 60 days).

I.4.2.3 Statistical analysis

In the orchards surveyed in 2013, we used a generalized linear model (GLM) with binomial error distribution followed by an analysis of deviance with a χ^2 -test to test the effect of the ant

factor (2 levels: ant colony present and absent) on the rate of fruit infestation by *B. dorsalis*. We used a similar method to test the effect of the ant factor on fruit fly abundance in fruits (i.e. total number of pupae collected from 25 fruits) except that we used a Poisson error distribution. In the fifteen orchards in 2012, a Pearson correlation test between weaver ant abundance and fruit fly abundance in the dry and rainy seasons was performed. Weaver ant and fruit fly abundances depending on the orchard type were compared for the dry and rainy seasons using the Kruskal-Wallis test. When a significant orchard type effect was detected after a Kruskal-Wallis test, we performed multiple comparison tests to separate factor modalities.

I.5 Results

I.5.1 Effect of *Oecophylla longinoda* presence on mango infestation by *Bactrocera dorsalis*

We evaluated *O. longinoda* potential to reduce mango infestations by *B. dorsalis* by comparing mango infestation levels on mango trees with a weaver ant colony and on mango trees without a weaver ant colony, on three different dates (May, July and August). The number of pupae for each lot of 25 mangoes was larger for trees without *O. longinoda* weaver ants than for trees with *O. longinoda* (July: $\chi^2 = 36.48$; df=1, $P < 0.001$; August: $\chi^2 = 291.94$; df = 1, $P < 0.001$; Figure 3). In May, there were no attacked fruits. In July, a total of 89 pupae was recorded from trees without *O. longinoda* colonies as opposed to 26 pupae from trees with *O. longinoda* colonies. In August, infestations had greatly increased with a total number of sampled pupae from trees without *O. longinoda* and with *O. longinoda* amounting to 392 and 53, respectively.

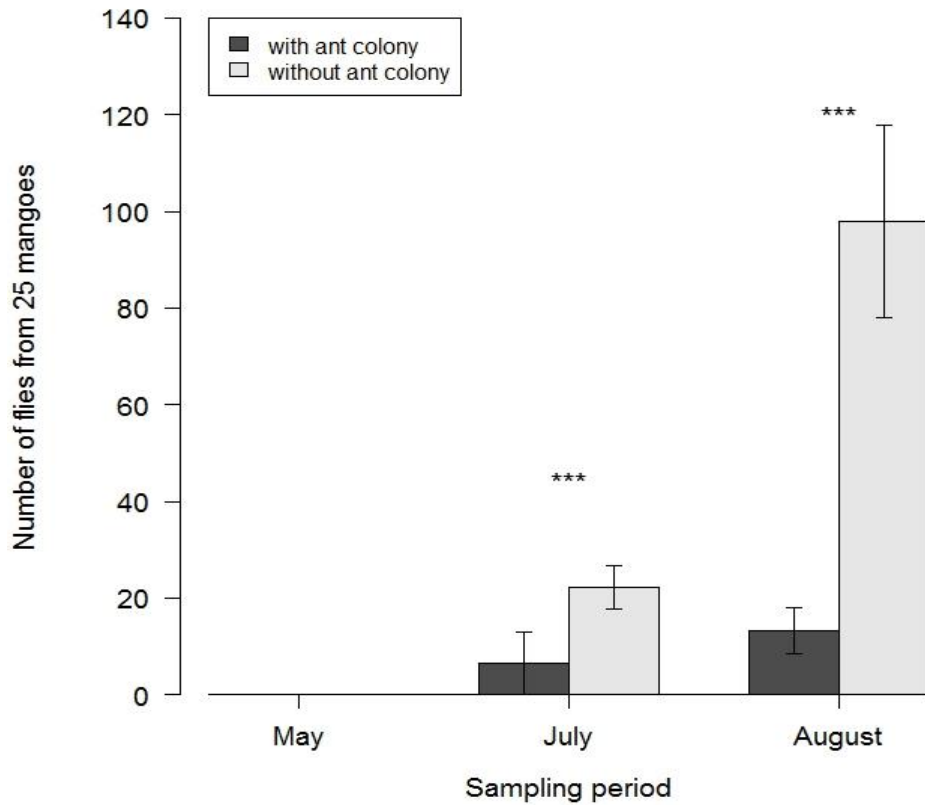


Figure 3: Mean (\pm SD; n=4) total number of *Bactrocera dorsalis* pupae collected from 25 mangoes per sampling period according to the presence (■) or absence (□) of an ant colony on trees. Asterisks indicate a significant difference between ant treatments (* $P < 0.1$, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$)

The mango infestation rate was also greater on trees without *O. longinoda* ants than on trees with *O. longinoda* ants (July: $\chi^2 = 4.09$, df = 1, $P < 0.05$; August: $\chi^2 = 5.20$, df = 1, $P < 0.05$; Figure 4). In July there were 6% of attacked mangoes on trees without an *O. longinoda* colony as opposed to 1% on trees with an *O. longinoda* colony. That difference was maintained a month later, in August, with 23% as opposed to 11% of attacked mangoes for trees without ants and with ants, respectively.

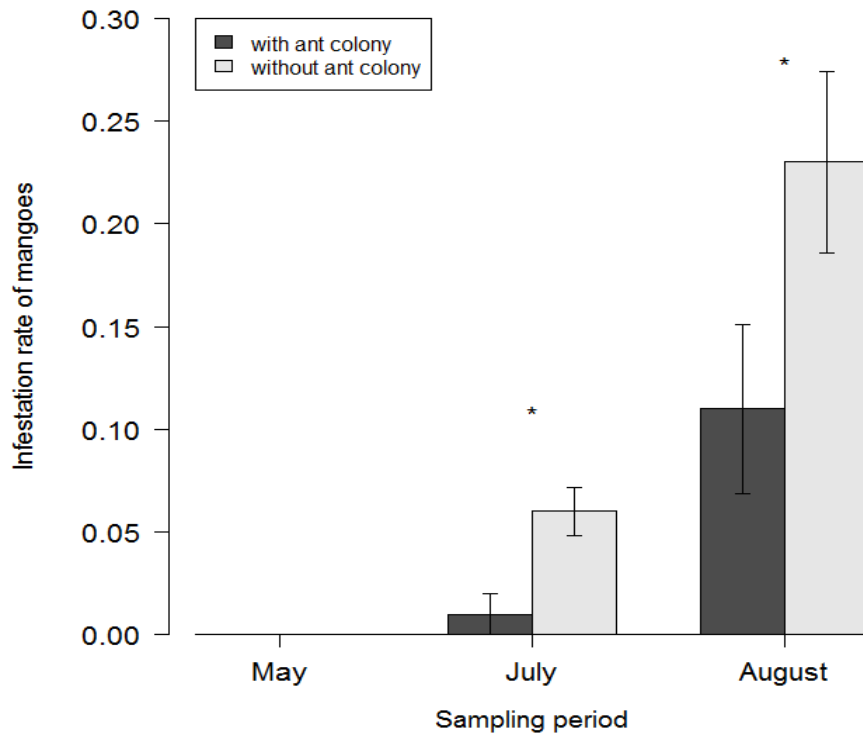


Figure 4: Mean (\pm SD; $n = 4$) infestation rate of mangoes per sampling period according to the presence (■) or absence (□) of ant colonies on trees. Asterisks indicate a significant difference between ant treatments (• $P < 0.1$, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$)

The average number of *B. invadens* pupae in infested fruits was also larger on trees without *O. longinoda* than on trees with *O. longinoda* (August: $F_{1,5} = 66.2$, $P < 0.001$). This effect could not be tested in July because there were not enough infested fruits for the “with” an ant colony modality. In August, there were 3 to 4 times more pupae per infested fruit on mango trees without *O. longinoda* (mean \pm SD: 17.0 ± 2.46) than on mango trees with *O. longinoda* (mean \pm SD: 4.9 ± 0.67).

I.5.2 Relationships between orchard design and management practices and weaver ant and fruit fly abundance in orchards

The abundance of *O. longinoda* was significantly correlated with the abundance of *B. dorsalis* in the rainy season ($r = -0.51$, $P < 0.05$; Figure 5). However, this correlation was not significant in the dry season ($r = 0.03$, $P = 0.54$). Overall, in the rainy season, the results showed that the more weaver ants there were in the orchard, the fewer fruit flies there were. However, one orchard (32B, type 4) displayed a different tendency: fruit fly abundance was low in it despite the low abundance of weaver ants.

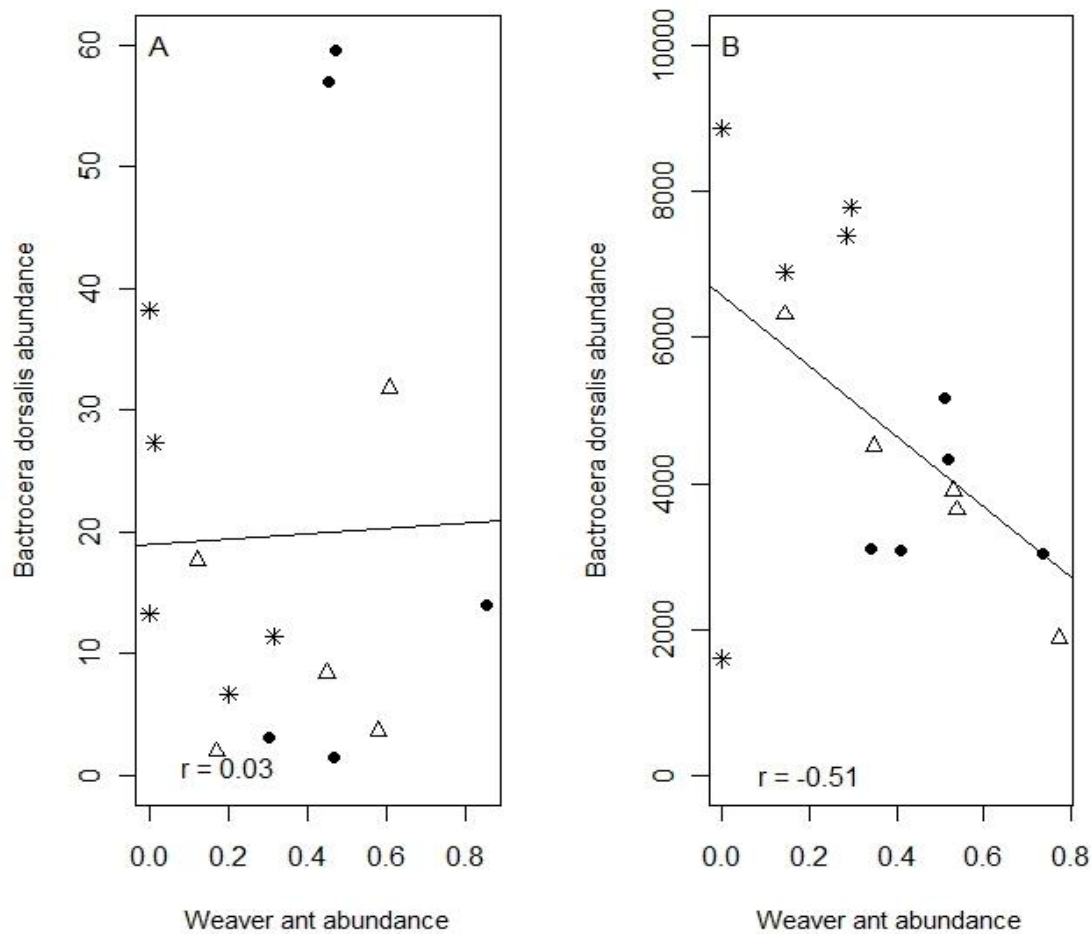


Figure 5: Relation between *Oecophylla longinoda* and *Bactrocera dorsalis* abundance in the fifteen orchards monitored in the dry season (A) and the rainy season (B).

r : Pearson correlation. Symbols indicate orchard types (●: type 1, “No-input mango diversified orchards”; △: type 3, “Medium-input citrus-predominant orchards”; *: type 4, “Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards”).

O. longinoda abundance was relatively uniform in the orchards between the dry and rainy seasons (Figure 6), while there was a large difference for *B. dorsalis* abundance between the two seasons (Figure 7).

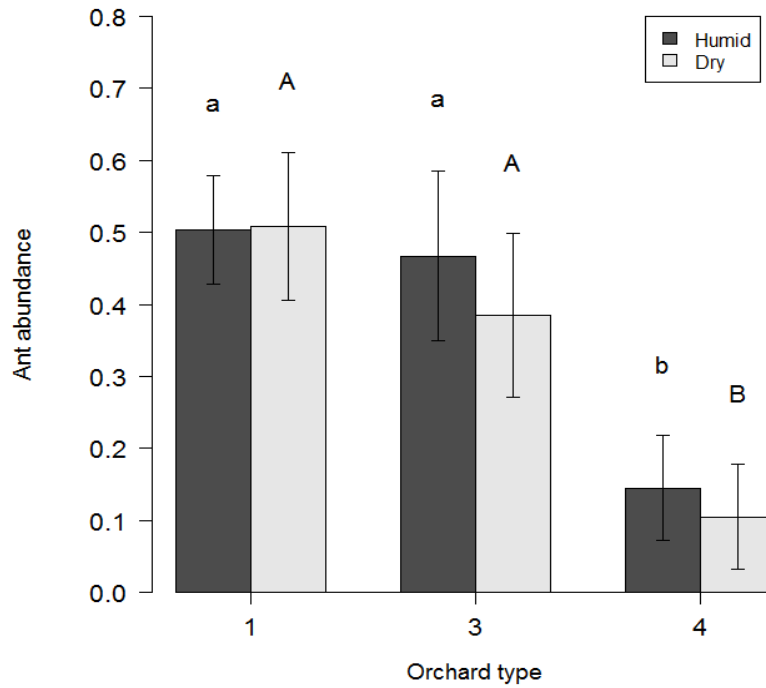


Figure 6: Mean (\pm SD; $n = 5$) ant abundance depending on orchard type during the humid (■) and dry (□) seasons. Orchard types with different letters are significantly different (Multiple comparison test after Kruskal-Wallis test; $P < 0.05$).

Orchard type: (1) “No-input mango diversified orchards”, (3) “Medium-input citrus-predominant orchards” and (4) “Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards”

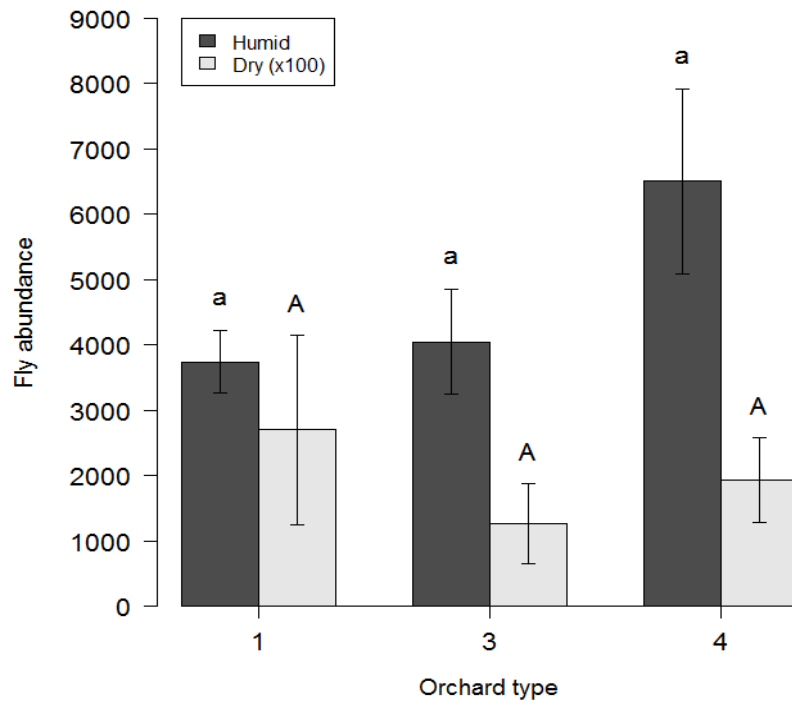


Figure 7: Mean (\pm SD; n = 5) fly abundance depending on orchard type during the humid (■) and dry (▨) seasons. Orchard types with the same letters are not significantly different (Multiple comparison test after Kruskal-Wallis test; $P < 0.05$).

Orchard type: (1) “No-input mango diversified orchards”, (3) “Medium-input citrus-predominant orchards” and (4) “Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards”

Fly abundance was greater in the rainy season. On average (\pm SD), *B. dorsalis* fly captures over 60 days were 27 (\pm 29), 13 (\pm 12) and 19 (\pm 13) individuals per orchard respectively in the dry season in orchard types 1, 3 and 4, and then 3,745 (\pm 970), 4,049 (\pm 1,601) and 6,503 (\pm 2,835) respectively in the rainy season for the same orchard types (Figure 7).

Orchard types 1 and 3 had higher weaver ant levels than orchard type 4 in the dry season ($\chi^2 = 6.51$, df = 2; $P < 0.05$) and in the rainy season ($\chi^2 = 7.27$; df = 2; $P < 0.05$). As regards *B. dorsalis* fruit fly abundance, there was no significant difference according to orchard type in the dry season ($\chi^2 = 0.56$; df = 2, $P = 0.76$). In the rainy season, even though there was no significant difference between orchard types ($\chi^2 = 3.5$; df = 2, $P = 0.17$), a clearer tendency appeared compared to the dry season (Figure 7): type 4 orchards tended to have higher fruit fly levels than orchard types 1 and 3. On average (\pm SD), *B. dorsalis* fly captures over 60 days were 6,503 (\pm 2,835) individuals per orchard for those of type 4 against 4,049 (\pm 1,601) and 3,745 (\pm 970) respectively for those of types 1 and 3.

1.6 Discussion and conclusion

Our results confirmed that the presence of *O. longinoda* ants on a tree led to a reduction in mango infestation levels on that tree. They showed that lower pupa numbers from fruits on trees with weaver ants were due not only to a lower fruit infestation rate, but also to the fact that flies laid fewer eggs on those fruits and/or that the predation rate of stage 3 larvae by ants was higher. In their study on the capacity of *O. longinoda* to protect mangoes against *B. dorsalis* in Benin, Van Mele *et al.* (2007) also showed that high *O. longinoda* populations considerably reduced fruit fly infestation rates.

Until now, mechanisms governing fruit fly control by weaver ants remained ambiguous. It seems, however, that the presence of *O. longinoda* ants affect fruit fly oviposition behaviour on the trees they occupy through a decreased oviposition time and number of eggs laid when *O. longinoda* have already patrolled those fruits (Vayssières *et al.* 2010; Vayssières *et al.* 2013). Chemical pheromone emission affecting fruit fly oviposition behaviour is the most evident supposition (Offenberg *et al.* 2004; Offenberg 2007; Adandonon *et al.* 2009; Van Mele *et al.*

2009), but the direct predation or pest deterrence are other phenomena influenced by this species (Van Mele *et al.* 2007; Aluja *et al.* 2005).

The study also highlighted a relation between the abundance of *O. longinoda* ants and that of *B. dorsalis* fruit flies in orchards. These abundances were negatively correlated. This observation confirms the results of Van Mele and Cuc (2007) showing that an orchard with abundant weaver ant populations have lower infestations of mites, leafminers and even fruit flies. This relationship probably partly depends on low *B. dorsalis* reproduction when weaver ants are present on trees, as indicated by the results for fruit infestation rates on trees “with” or “without” an ant colony. On the other hand, the abundance of *O. longinoda* and *B. dorsalis* varied depending on the orchard types. Orchards types 1 and 3 had more *O. longinoda* ants and tended to have fewer *B. dorsalis* than the type 4 orchards. Moreover, this tendency was supported by the first observations carried out in 2010 in other sampled orchards chosen in the same study area: over a twenty-week period in the rainy season, 9,720 *B. dorsalis* flies were captured per trap on average from type 4 orchards as opposed to 7,230 for the other two types (Grechi *et al.* 2013). The conditions favouring abundant weaver ant populations included limited human disturbance (Van Mele & Cuc 2007). In our study, type 1 orchards were those that registered virtually no inputs and no human intervention, while higher levels were recorded in the type 3 orchards, and even more in those of type 4 (Grechi *et al.* 2013). Among the type 4 orchards, one orchard (32B) presented a different tendency in comparison to the other orchards in the rainy season. *O. longinoda* abundance was low, as in the other orchards of the same type; conversely, *B. dorsalis* fly abundance was low while it was high in the other orchards. The type 4 orchards were the ones registering the most insecticide treatments. Visibly, these insecticide applications did not help to reduce damage caused by fruit flies. There may be many reasons for this. First, crop pests, and precisely fruit flies, can develop resistance mechanisms against insecticides (Devine & Furlong 2007; Kakani & Mathiopoulos 2008). Second, data on farming practice intensity (*e.g.* pesticide application frequency or picking of fallen fruits) helping to characterize orchards did not indicate whether practices were well mastered and well applied by farmers (Grechi *et al.* 2013). So, incorrectly used insecticides may be ineffective against target pests, and may also reduce the abundance of natural enemies and their capacity to regulate pests (Van Hamburg & Guest 1997). Furthermore, treatments were carried out in general on the foliage areas of trees overlooking eggs, larvae and pupae contained in fallen fruits. Effective pest management should take into account those fruits. Even if fallen fruits are collected, it might be ineffective if collected fruits are gathered in a corner of the orchard without sealing them in plastic bags or destroying them. This method provides

greater guarantees in fruit fly management when combined with male or female pheromone trapping and also with Success Appat applications (Verghese *et al.* 2006; Piñero *et al.* 2009; Manrakhan *et al.* 2011).

The large numbers of *B. dorsalis* fruit flies in the rainy season depended on the species' biology, benefiting from good weather conditions and from the wide availability of host fruits in which to reproduce. In the dry season, which is considered as an unfavourable period for *B. dorsalis* development, the pest was present in the three orchard types in low levels. Depending on their structural design and specific plant composition, the three orchard types displayed aspects suspected of retaining *B. dorsalis* in orchards during the dry season. Type 3 orchards had greater tree crop diversity than orchard types 1 and 4, and type 1 orchards had more fruit species and species diversity in their hedgerows than orchard types 3 and 4 (Grechi *et al.* 2013). These two elements were potentially conducive to fly multiplication and mango re-infestation during the ripening period, because *B. dorsalis* is a polyphagous pest which can infest cultivated or wild fruits of at least 46 species belonging to 23 botanical families (Goergen *et al.* 2011). In addition, Ndiaye *et al.* (2012) showed that some host plants such as *Ziziphus mauritiana* or *Capparis tomentosa*, which are generally used as protective hedges in Senegalese mango-based agroecosystems, sustain *B. dorsalis* flies before the mango ripening period. Type 4 orchards had greater protective species in their hedgerows than orchard types 1 and 3. The use of *B. dorsalis* host plants as protective hedges should therefore be reconsidered for the management of this fly (Ndiaye *et al.* 2012).

To conclude, the different results of this study highlighted: i) the positive impact of the *O. longinoda* ant in limiting *B. dorsalis* mango infestations, ii) a major negative correlation between the abundance of *O. longinoda* and that of *B. dorsalis* in the orchards in the rainy season and iii) a relation between these abundances and the orchard design and management practices. In Senegal, weaver ants are considered as harmful insects. The majority of producers consider them as pests because of the marks they leave on fruits and the painful bites they inflict during fruit harvesting. Some producers go further and eradicate them completely from their orchards (L. DIAME pers. comm.). This kind of result may convince them of the importance of weaver ants as biological control agents and change the perception of these special ants in fruit-based agroecosystems.

These results are part of studies on the relationships between the management practices of growers and their effects on pests and their natural enemies. The first step was to develop a methodology and only the Niayes area and Thies plateau regions were investigated. Now the methodology has been finalized, it should be used in further studies to investigate these

relationships in other areas of Senegal, especially the mango-rich Casamance province, and in other West Africa countries in contrasted conditions.

Acknowledgments

We should like to thank all the fruit producers in the 15 orchards in the Niayes zone and the Thiès plateau for their collaboration during the study. Thanks are also due to PDMAS (Projet de Développement des Marchés Agricoles du Sénégal) for financial support. We also thank R. Blatrix (CEFE/CNRS, Montpellier, France) for his advices and P. Biggins for correcting the English.

II. LISTE DE LA MYRMECOFAUNE DU SENEGAL ET BIODIVERSITE DES FOURMIS ASSOCIEE AUX AGROECOSYSTEMES FRUITIERS

Article 2

A preliminary checklist of the ant (Hymenoptera, Formicidae) fauna of Senegal

*Lamine DIAME^{1,2}, Brian TAYLOR³, Rumsais BLATRIX⁴, Jean-François VAYSSIERES^{5,6}, Jean-Yves REY^{1,5}, Isabelle GRECHI⁷, Karamoko DIARRA²

Manuscrit soumis à **ZooKeys** le 30/01/2015

II.1 Résumé

Ce travail présente la première liste des espèces de fourmis connues au Sénégal à nos jours, basée sur la revue de la littérature et sur un récent échantillonnage approfondi dans des agrosystèmes de la région de Dakar et le plateau de Thiès en saison pluvieuse et en saison sèche. Quatre-vingt-treize (93) espèces appartenant à 31 genres et 9 sous familles de Formicidae ont été répertoriées. Les genres les plus représentatifs étaient *Monomorium* Mayr, 1855 et *Camponotus* Mayr, 1861 avec respectivement 13 et 12 espèces. La nouvelle collection fait apparaître 31 espèces échantillonnées au Sénégal pour la première fois, dont 3 non encore décrite. La composition de la faune des fourmis reflète la situation du Sénégal en tant qu'écozone intermédiaire entre l'Afrique du nord et les régions du sud du Sahara.

Mots clés : fourmis, liste, nouvelles collections, pays au sud du Sahara, Sénégal

II.2 Abstract

This work presents the first checklist of the ant species of Senegal, based on a review of the literature and on recent thorough sampling in Senegalese orchard agrosystems during rainy and dry seasons. Ninety-three (93) species belonging to 31 genera and 9 subfamilies of Formicidae were recorded. The most speciose genera were *Monomorium* Mayr, 1855, and *Camponotus* Mayr, 1861, with 13 and 12 species, respectively. The fresh collection yielded 31 species recorded for the first time in Senegal, including 3 undescribed species. The composition of the

ant fauna reflects the fact that Senegal is an intermediate ecozone between North Africa and sub-Saharan areas.

Keywords: ants, checklist, new records, sub-Saharan country, Senegal

II.3 Introduction

Information on the ant fauna of Senegal is mostly known from scattered historical records, and no synthetic list has been published. The first record dates from 1793 while the most recent was in 1987 (see http://antsof africa.org/ant_species_2012/africa_map.htm). Presence data can also be deduced from papers studying the ecology and/or the behaviour of some ant species (Agbogba, 1989; 1991; 1992; Agbogba and Howse, 1992; Gillon *et al.*, 1984). Other have reported the participation of ant species in the diet of animals such as Chimpanzees (Bogart and Pruetz, 2011; McGrew *et al.*, 2005).

The two Senegalese agroecosystems known as the “*Niayes*” and “*Plateau de Thiès*” (Figure 8) represent two major fruit and vegetable production areas in Senegal. Plant diseases and damage caused by fruit flies are becoming common to these two agroecosystems. Ants are important components of ecosystems (Hölldobler and Wilson, 1990; Passera and Aron, 2005) and are even considered as ecosystem engineers (Folgarait, 1998). Because of their predatory behaviour, ants can be helpful auxiliaries in pest control (Philpott and Armbrrecht, 2006; Van Mele *et al.* 2007; Dwomoh *et al.*, 2008). A meta-analysis of studies in agroecosystems has found that generalist predators (single- and multiple-species assemblages) controlled herbivore abundance (79% of studies) and reduced plant damage and increased plant yields (65% of studies) (Symondson *et al.*, 2002).

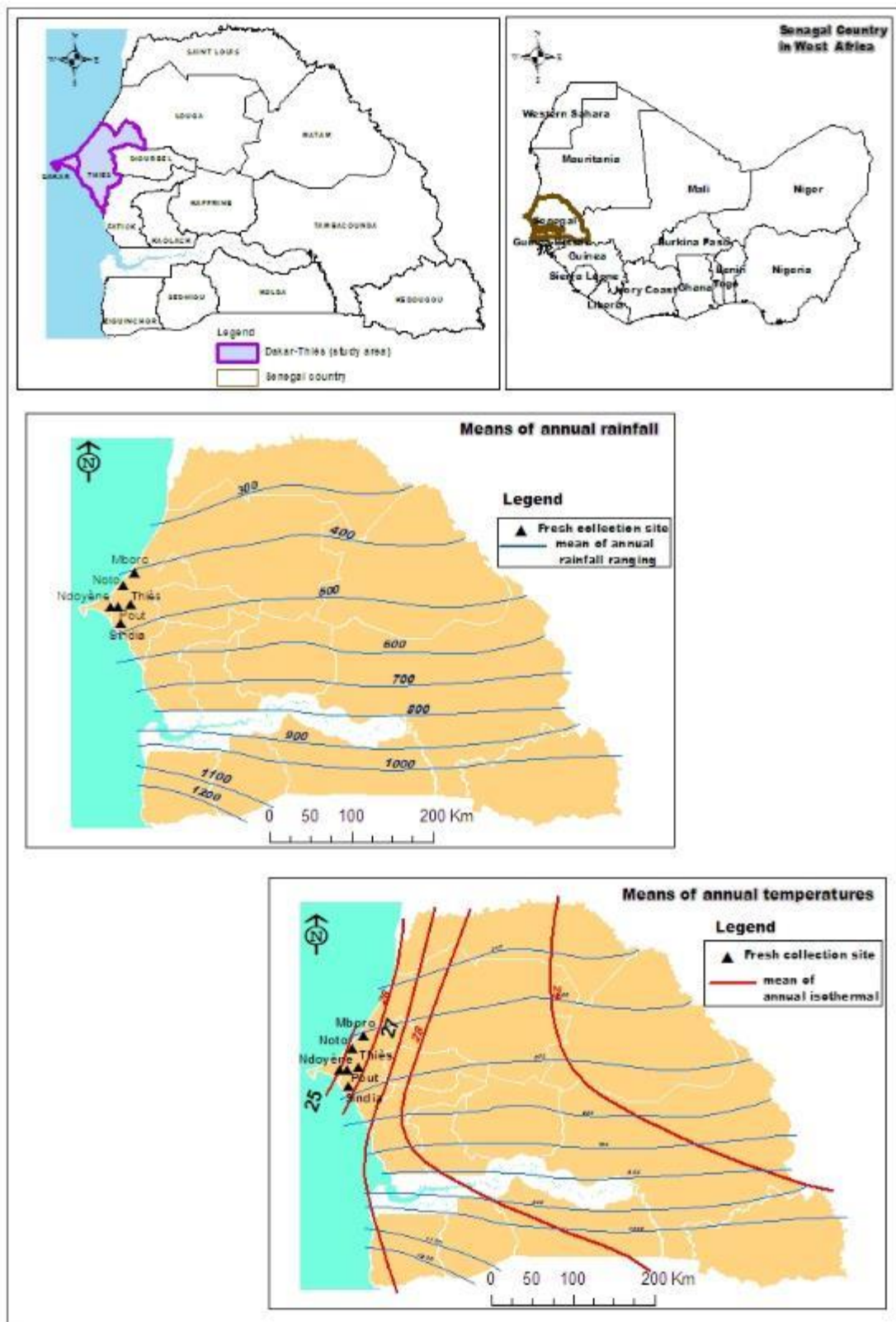


Figure 8: Maps presenting Senegal in West Africa, the “Niayes” and “Plateau de Thiès” (two agroecosystems zones in Senegal where fresh collection of ants was carried out), and the averages of annual rainfall and annual temperatures in the country (source: Atlas Jeune Afrique, 2000)

A detailed description of the ant fauna of the “*Niayes*” and “*Plateau de Thiès*” agroecosystems has thus been undertaken, and might provide useful information for the knowledge of the ant fauna of Senegal. This paper presents a more recent list of the ant species of Senegal based on a review of the literature and on material we collected in the “*Niayes*” and “*Plateau de Thiès*” orchard agroecosystems.

II.4 Methods

Our literature review is based on historical taxonomy papers as well as other ant-related papers. A large part of this literature review, as well as additional data, was available from the second author’s web site on the ants of Africa (<http://www.antsof africa.org/>). The new investigations were conducted in orchard agroecosystems of the “*Niayes*” and “*Plateau de Thiès*”. These regions are characterized by ferralic arenosols and a sudano-sahelian climate with unimodal rainfall from July to September. Although climate is sudano-sahelian for these agroecosystem zones, temperatures are lowest in the west, especially in the northern coast than in the center of the country. For instance, the ‘*Niayes*’ localities benefit to winds ocean influence that permit them to record more longer low temperatures than localities of ‘*Plateau de Thiès*’ (Figure 3.7).

Ants were sampled in 51 orchards in 2012, during both the dry and rainy seasons, using pitfall traps (40 in each orchard) distributed on the ground over all microhabitats (sun exposed habitats, shaded habitats and hedges), hand collection (on ground, tree trunks, dead woods etc) and dietary baits (tuna fish). Ants were placed in plastic vials filled with 80° alcohol. Once in the laboratory, each sample was sorted and the specimens classified into morphospecies. Specimens of each morphospecies were examined and identified by Dr Brian Taylor and can be viewed on his website (http://www.antsof africa.org/ant_species_2012/new_records_senegal.htm).

The species list we present is arranged in alphabetic order by subfamily, genus and species. Nomenclature of the species largely follows Bolton online catalogue of the ants of the world (AntCat) web site (<http://www.antcat.org/catalog/>; Accessed December 2014).

II.5 Results

The ant species list of Senegal (Table 5) contains 90 described species and three species new to science. These three undescribed species belong to the genera *Monomorium*, *Tapinolepis* and *Tetramorium*. The 93 species are distributed across 31 genera belonging to 9 subfamilies

(Aenictinae, Amblyoponinae, Cerapachyinae, Dolichoderinae, Dorylinae, Formicinae, Myrmicinae, Ponerinae, and Pseudomyrmecinae). The most speciose subfamily is Myrmicinae and the most speciose genera is *Monomorium* with 43 and 13 species respectively (Table 5).

Table 4: Checklist of the ant species of Senegal. The list is arranged alphabetically by subfamily, genus and species. Names in bold refer to species recorded in Senegal for the first time. Species with an asterisk have been recorded in our survey of orchard agroecosystems in the “Niayes” and “Plateau de Thiès”

Subfamilies	Scientific valid name, author descriptor and year of species description	References of collection or the last report of the species in Senegal
AENICTINAE	<i>Aenictus furculatus</i> Santschi, 1919	Santschi, 1920a
	<i>Aenictus fuscovarius</i> Gerstäcker, 1859	Wheeler, 1922
	<i>Aenictus humeralis</i> Santschi, 1910	Santschi, 1910
	<i>Aenictus soudanicus</i> Santschi, 1910	Santschi, 1913
AMBLYOPONINAE	<i>Amblyopone santschii</i> Menozzi, 1922	Menozzi, 1922
CERAPACHYINAE	* <i>Cerapachys longitarsus</i> (Mayr, 1879)	
DOLICHODERINAE	* <i>Tapinoma demissum</i> Bolton, 1995	
	* <i>Tapinoma melanocephalum</i> (Fabricius, 1793)	
	* <i>Technomyrmex senex</i> Bolton, 2007	
DORYLINAE	* <i>Dorylus aegyptiacus</i> Mayr, 1865	
	<i>Dorylus affinis</i> Shuckard, 1840	Santschi, 1914
	<i>Dorylus burmeisteri</i> Santschi, 1912	Santschi, 1912; Bogart & Pruetz, 2011
	<i>Dorylus fulvus</i> Westwood, 1839	Santschi, 1914
	<i>Dorylus striatidens</i> Santschi, 1910	Santschi, 1910
FORMICINAE	<i>Camponotus acvapimensis</i> Mayr, 1862	Mayr, 1895
	<i>Camponotus aegyptiacus</i> Emery, 1915	Santschi, 1926
	<i>Camponotus bituberculatus</i> André, 1889	André, 1889
	<i>Camponotus compressiscapus</i> André, 1889	André, 1890
	<i>Camponotus foraminosus</i> Forel, 1879	Forel, 1879
	<i>Camponotus ilgii</i> Forel, 1894	Santschi, 1913
	<i>Camponotus maculatus</i> Fabricius, 1782	Emery, 1892
	* <i>Camponotus oasisium</i> Forel, 1890	
	<i>Camponotus sericeus</i> Fabricius, 1798	Santschi, 1914
	<i>Camponotus solon</i> Forel, 1886	Forel, 1901
	* <i>Camponotus vestitus</i> F Smith, 1858	
	<i>Camponotus vividus</i> Forel, 1886	Santschi, 1914
	* <i>Cataglyphis abyssinica</i> Forel, 1904	
	<i>Cataglyphis congolensis</i> Santschi, 1929	Santschi, 1929
	* <i>Cataglyphis savignyi</i> Dufour, 1862	
	* <i>Lepisiota acholli</i> Weber, 1943	
	<i>Lepisiota canescens</i> Emery, 1897	Santschi, 1914
	<i>Lepisiota capensis</i> Mayr, 1862	Mayr, 1895
	* <i>Lepisiota laevis</i> Santschi, 1913	Santschi, 1913
	* <i>Oecophylla longinoda</i> (Latreille, 1802)	Santschi, 1914
	* <i>Paratrechina longicornis</i> (Latreille, 1802)	Latreille, 1802
	<i>Paratrechina subtilis</i> Santschi, 1920	Santschi, 1920b
	* <i>Tapinolepis simulans</i> Santschi, 1908	
	* <i>Tapinolepis sp</i>	
MYRMICINAE	<i>Aphaenogaster senilis</i> Mayr, 1853	Agbogba, 1985; 1986
	<i>Aphaenogaster subterranea</i> (Latreille, 1798)	Agbogba, 1985; 1986; 1989

	<i>Atopomyrmex mocquersyi</i> André, 1889	André, 1889
	<i>Carebara sicheli</i> Mayr, 1862	Mayr, 1862
	<i>Carebara silvestrii</i> Santschi, 1914	Santschi, 1914
	*Cardiocondyla emeryi Forel, 1881	
	*Crematogaster brunneipennis André, 1890	
	*Crematogaster censor Forel, 1910	Forel, 1910
	<i>Crematogaster coelestis</i> Santschi, 1911	Santschi, 1939
	<i>Crematogaster depressa</i> Latreille, 1802	Mayr, 1895
	*Crematogaster kneri Mayr, 1862	Santschi, 1914
	*Crematogaster senegalensis Roger, 1863	Forel, 1910
	<i>Melissotarsus emeryi</i> Forel, 1907	Santschi, 1914
	*Meranoplus magretti André, 1884	
	*Messor galla Mayr, 1904	Bolton, 1982 ; Gillon et al., 1984
	*Monomorium areniphilum Santschi, 1911	Santschi, 1919
	*Monomorium bicolor Emery, 1877	Santschi, 1914
	*Monomorium dakarense Santschi, 1914	Santschi, 1914
	*Monomorium mayri Wheeler, 1915	
	*Monomorium oscaris Bolton, 1987	Forel, 1910
	*Monomorium osiridis Santschi, 1915	
	<i>Monomorium pharaonis</i> (Linnaeus, 1758)	Santschi, 1914
	<i>Monomorium rosae</i> Santschi, 1920	Bolton, 1987
	*Monomorium salomonis (Linnaeus, 1758)	
	<i>Monomorium senegalense</i> Roger, 1862	Roger, 1862
	<i>Monomorium subopacum</i> (Smith, 1858)	Santschi, 1913
	*Monomorium vonatu Bolton, 1987	
	*Monomorium sp	
	<i>Myrmicaria opaciventris</i> Emery, 1893	Forel, 1909
	*Pheidole aeberlii Forel, 1894	Santschi, 1914
	*Pheidole andrieui Santschi, 1930	
	*Pheidole bequaerti Forel, 1913	
	*Pheidole megacephala (Fabricius, 1793)	Santschi, 1914
	*Pheidole mentita Santschi, 1914	
	*Pheidole rugaticeps Emery, 1877	Santschi, 1914
	*Pheidole termitophila Forel, 1904	Santschi, 1914
	*Pheidole welgelegenensis Forel, 1913	
	*Tetramorium angulinode Santschi, 1910	
	*Tetramorium muscorum Arnold, 1926	
	*Tetramorium rothschildi Forel, 1907	
	*Tetramorium sericeiventris Emery, 1877	Bolton, 1980
	*Tetramorium simillimum F Smith, 1851	
	*Tetramorium sp	
PONERINAE	*Anochetus bequaerti Forel, 1913	
	*Anochetus rothschildi Forel, 1907	
	*Anochetus sedilloti Emery, 1884	Santschi, 1923
	<i>Bothroponera talpa</i> André, 1890	André, 1890
	*Brachyponera sennaarensis (Mayr, 1862)	Santschi, 1921
	<i>Leptogenys longiceps</i> Santschi, 1914	Santschi, 1914
	<i>Megaponera analis</i> (Latreille, 1802)	Santschi, 1914; Bogart & Pruetz, 2011
	<i>Mesoponera ambigua</i> (André, 1890)	André, 1890
	<i>Mesoponera caffraria</i> (F Smith, 1858b)	Agbogba, 1991; 1992; Agbogba and Howse, 1992
	<i>Mesoponera senegalensis</i> (Santschi, 1914)	Santschi, 1914

	* <i>Paltothyreus tarsatus</i> (Fabricius, 1798)	Santschi, 1914
PSEUDOMYRMECI NAE	* <i>Tetraponera claveaui</i> Santschi, 1913	Santschi, 1913

After comparing our material with the data available in the literature, we found that 28 species were not yet recorded in Senegal. These 28 species and the three undescribed species are listed below.

List of the 28 described species recorded in Senegal for the first time:

Anochetus bequaerti Forel, 1913, Pout (14°45'N; 17°03'W – 37m), 21.V.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Anochetus rothschildi Forel, 1907, Peyckouk (14°45'31.88''N; 16°52'56.31'W – 53m), 12.VIII.2012; Pout (14°45'28.14''N; 17°03'02.78'W – 36m), 06.VIII.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor, workers and queen collected.

Camponotus vestitus (Smith, 1858), Ndoyenne (14°45'47.79''N; 17°09'09.35''W – 49m), 04.V.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Camponotus oasis Forel, 1890, Ndoyenne (14°45'46.32''N; 17°09'21.17''W – 49m), 29.VI.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor, minor workers collected.

Cardiocondyla emeryi Forel, 1881, Notto (14°59'07.76''N; 17°00'04.10''W – 24m), 13.IV.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Cataglyphis abyssinica Forel, 1904, Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012; Ndoyenne (14°45'47.79''N; 17°09'09.35''W – 49m), 04.V.2012 collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Cataglyphis savignyi Dufour, 1862, Sindia (14°34'53.84''N; 17°02'24.52''W – 30m), 20.II.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012 collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Cerapachys longitarsus (Mayr, 1879), Peyckouk (14°45'35.02''N; 16°52'56.19''W – 59m), 12.VIII.2012; Sindia (14°34'53.84''N; 17°02'24.52''W – 30m), 20.II.2012; Ndoyenne (14°45'09.95''N; 17°03'43.49''W – 48m), 21.VI.2012; collect. L. Diamé, det B. Taylor.

Crematogaster brunneipennis André, 1890, Ndoyenne (14°45'09.95''N; 17°03'43.49''W – 48m), 21.VI.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Dorylus aegyptiacus Mayr, 1865, Pout sigelec (14°45'40.38''N; 17°02'25.40''W – 43m), 21.VI.2012; Ndoyenne (14°45'09.95''N; 17°03'43.49''W – 48m), 21.VI.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor, media workers collected.

Lepisiota acholli Weber, 1943, Ndoyenne (14°46'05.25''N; 17°09'04.54''W – 50m), 07.IV.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Meranoplus magrettii André, 1884, Pout (14°45'28.14''N; 17°03'02.78''W – 36m), 06.VIII.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Monomorium mayri Wheeler, 1915, Ndoyenne (14°47'54.14''N; 17°08'30.99''W – 45m), 24.V.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Monomorium osiridis Santschi, 1915, Sindia (14°34'54.52''N; 17°02'23.12''W – 30m), 20.II.2012; Pout (14°45'N; 17°03'W – 37m), 21.V.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Monomorium salomonis (Linnaeus, 1758), Notto (14°58'54.28''N; 17°00'26.19''W – 31m), 22.VI.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Monomorium vonatu Bolton, 1987, Pout (14°45'35.95''N; 17°03'23.58''W – 34m), 21.VII.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Pheidole andrieui Santschi, 1930, Pout (14°45'30.12''N; 17°03'26.81''W – 34m), 21.VII.2012; Thies (14°47'03.77''N; 16°58'04.41''W – 84m), 20.IV.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor, minor workers collected.

Pheidole bequaerti Forel, 1913, Ndoyenne, (14°46'22.08''N; 17°03'49.90''W – 45m), 21.VI.2012; Thies (14°47'03.77''N; 16°58'04.41''W – 84m), 20.IV.2012; Pout

(14°45'28.14''N; 17°03'02.78W – 36m), 06.VIII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor, minor workers collected.

Pheidole mentita Santschi, 1914, Sindia (14°34'23.13''N; 17°02'17.44''W – 30m), 20.II.2013; Thies (14°47'03.77''N; 16°58'04.41''W – 84m), 20.IV.2012; Peyckouk (14°45'35.02''N; 16°52'56.19''W – 59m), 12.VIII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor, major and minor workers collected.

Pheidole welgelegenensis Forel, 1913, Thies (14°47'03.77''N; 16°58'04.41''W – 84m), 20.IV.2012; Ndoyenne, (14°46'22.08''N; 17°03'49.90''W – 45m), 21.VI.2012; Pout (14°45'30.12''N; 17°03'26.81''W – 34m), 21.VII.2012; Thies (14°47'03.77''N; 16°58'04.41''W – 84m), 20.IV.2012; Notto (14°58'54.28''N; 17°00'26.19W – 31m), 22.VI.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor, minor workers collected.

Tapinolepis simulans Santschi, 1908, Thies (14°47'03.12''N; 16°58'02.10''W – 84m), 28.VII.2012; Peyckouk (14°45'35.02''N; 16°52'56.19''W – 59m), 12.VIII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Tapinoma demissum Bolton, 1995, Pout (14°45'13.62''N; 17°03'07.71''W – 38m), 26.IV.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Tapinoma melanocephalum (Fabricius, 1793), Ndoyenne (14°46'18.15''N; 17°03'44.90''W – 47m), 07.IV.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Technomyrmex senex Bolton, 2007, Notto (14°56'26.62''N; 17°01'31.66W – 23m), 18.VI.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Tetramorium angulinode Santschi, 1910, Pout (14°45'21.30''N; 17°03'14.35''W – 35m), 08.V.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Tetramorium muscorum Arnold, 1926, Pout sigelec (14°45'52.52''N; 17°02'49.36W – 40m), 27.IV.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Tetramorium rothschildi Forel, 1907, Notto (14°58'12.42''N; 17°01'27.28W – 29m), 18.VI.2012; Pout (14°45'21.30''N; 17°03'14.35''W – 35m), 08.V.2012; Thies (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Tetramorium simillimum F Smith, 1851, Ndoyenne (14°45'38.85''N; 17°08'51.95W – 44m), 24.V.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

List of the three undescribed species:

Monomorium sp, Pout (14°45'30.12''N; 17°03'26.81''W – 34m), 21.VII.2012; Thiès (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Image:

http://antsofafrica.org/ant_species_2012/monomorium/monomorium_nsp_diame_senegal/monomorium_nsp_diame_senegal.htm.

Tapinolepis sp, Thiès (14°47'22.16''N; 16°57'57.16''W – 78m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Image:

http://antsofafrica.org/ant_species_2012/tapinolepis/tapinolepis_nsp_rva2949/tapinolepis_nsp_rva2949.htm.

Tetramorium sp, Pout (14°45'30.12''N; 17°03'26.81''W – 34m), 21.VII.2012; Thiès (14°47'03.12''N; 16°58'02.10''W – 84m), 28.VII.2012, collect. L. Diamé, det. B. Taylor.

Image:

http://antsofafrica.org/ant_species_2012/tetramorium/tetramorium_nsp_diame_senegal/tetramorium_nsp_diame_senegal.htm.

II.6 Discussion

With 93 species recorded, the ant fauna of Senegal can be considered as relatively diverse, especially in view of the size of the country and that several important zones were not investigated compared to the other neighbouring Sahelian countries such as Mali, or Niger, where 33 and 10 species respectively are nowadays recorded (Taylor website). In particular, samples collected in the fruit-based agroecosystems from the “*Niayes*” and “*Plateau de Thiès*” regions show a high relative ant diversity. The climatic preferences of the species listed in this paper show Senegal to be an intermediate ecozone between North Africa and the sub-Saharan area.

Ants may be useful auxiliaries in pest management because of the many relationships they have with other components of ecosystems. The knowledge of the ant diversity in underlined agroecosystems may prove useful for developing sustainable pest management programs. For instance, ant species such as *O. longinoda* for mango and *Citrus* fruit flies (Van Mele et al., 2007; Sinzogan et al., 2008), *Pachycondyla analis* (now revised to *Megaponera analis*) against termites pests (Yusuf et al., 2013; Yusuf et al., 2014) can be suitable biocontrol agents into developed IPM (Integrated Pest Management) programs in view of the problems generated by flies and termites in such agroecosystems.

It is likely that the total number of ant species for Senegal is actually higher since our collection campaigns concerned only the western part of the country crossing Saint-Louis, Thiès, Dakar and Casamance regions. First, just the survey in the orchard agroecosystems of the “Niayes” and “Plateau de Thiès” in 2012 revealed 29 species new to Senegal, i.e. about one third of the published ant fauna of Senegal. Similar sampling efforts conducted in other localities such as Ferlo, Djolof, Sine Saloum or Niokolo Koba ecosystems could detect many additional species. For instance, the richness of the Ponerinae subfamily in Guinean ant fauna (48 species), Ivory Coast ant fauna (36 species) or Ghana ant fauna (58 species), suggests this should be richer for Senegal if intensive sampling was carried out in forested landscape located in the south part of country as well as Casamance region. Second, from north to south, the country is crossed by four vegetation types induced by the Sahel, the Sudano-sahelian Savannah, the Sudan Savannah and the south Guinea Savannah climates which can promote various ant fauna. Indeed, ant community composition and diversity vary according to climatic zones. For instance, energy-speciation induced by available local resources (Kaspari, et al. 2004), the gradient of the altitude and latitude (Ward, 2000) or the sea level (Lach, et al., 2010) are geographic parameters often indexed as influencing ant fauna.

Acknowledgments

We would like to thank PDMAS (Programme de Développement des Marchés Agricoles du Sénégal) which supported the financial part of this work. Thanks are also dedicated to Hubert de Bon (CIRAD-UPR HortSys) for all professional contacts he initiated and all financial issues he undertook for the article. We are grateful to Annie Boyer (CIRAD-Dist) for his help about bibliographic research related

to the published ants for Senegal. We thank the orchard owners for allowing us to conduct this survey in good conditions and for help in fields work.

III. RELATIONS ENTRE LES CARACTERISTIQUES DU VERGER ET LES COMMUNAUTES DE FOURMIS

Article 3

Relations between the design and management of Senegalese orchards and ant diversity and community composition

Lamine DIAME^{1,2,*}, Rumsaïs BLATRIX³, Isabelle GRECHI⁴, Jean-Yves REY^{1,5}, Cheikh Amet Bassirou SANE^{1,2}, Jean-François VAYSSIERES^{5,6}, Hubert DE BON⁵, Karamoko DIARRA²

Manuscrit soumis à Agriculture, Ecosystems and Environment, le 27/05/2015 accepté le 04/07/2015, en ligne depuis le 17/07/2015

III.1 Résumé

Bien que l'agriculture soit un facteur majeur sur les changements environnementaux, le niveau de son impact est vraisemblablement lié aux pratiques agricoles. Ainsi, nous avons cherché à déterminer comment les pratiques de conception et d'entretien des vergers pourraient affecter la composante naturelle des agroécosystèmes et l'utilisation durable des terres agricoles. En particulier, nous avons examiné la biodiversité et la composition des communautés de fourmis comme étant reliées à la conception et aux pratiques d'entretien du verger. Les résultats ont montré que l'effet des pratiques était significatif, bien que faible, et qu'une typologie des vergers basée sur la conception et les pratiques d'entretien était congruente avec une typologie basée sur la composition des communautés de fourmis. Les différents types de vergers montraient des différences de richesse et de diversité des fourmis. D'ailleurs, la richesse et la diversité de fourmis étaient positivement corrélées avec la richesse des plantes fruitières. Nous étions aussi capables d'identifier quelques espèces de fourmis étant reliées aux pratiques agricoles. Par exemple, *Monomorium salomonis* (L.) était étroitement associée avec la forte irrigation, la fertilisation et les applications importantes de pesticides, alors que *Paltothyreus tarsatus* était associée avec une importante richesse de plantes fruitières, une importante densité de couverture de sol par la canopée des arbres, une importante litière et un grand coefficient de variation de densité locale de plantation. Cette étude apparaît comme une première tentative à caractériser les relations existant entre la conception et les pratiques d'entretien des vergers et le fonctionnement des agroécosystèmes à base des fruitiers en milieu sahélien permettant ainsi

d'envisager des recommandations dans les stratégies de gestion durable de ces agroécosystèmes.

Mots clés : fourmis, Formicidae, bioindicateurs, agroécosystème sahélien, vergers à base de manguiers et d'agrumes, Sénégal, agriculture durable

III.2 Abstract

Although agriculture is a major factor in environmental change, the level of its impact is likely to vary with farming practices. Thus, we sought to determine how farming practices might affect the natural compartment of agroecosystems and the sustainable use of land. In particular, we examined ant biodiversity and community composition as related to orchard design and management practices in the mango- and citrus-based orchard agroecosystems of Senegal. Ants were collected using pitfall traps in 49 orchards classed in four types based on their design and management. The results showed that the effect of practices was significant, albeit weak, and a typology of orchards based on design and management practices was congruent with a typology based on the composition of ant communities. The different types of orchard were seen to differ in the richness and diversity ant species. Moreover, ant richness and diversity was positively correlated with tree richness. We were also able to identify some ant species as being related to agricultural practices. For instance, *Monomorium salomonis* (L.) was closely associated with high irrigation, fertilization and pesticide use, whereas *Paltotyreus tarsatus* was associated with greater tree richness, high local ground coverage by the tree canopy, more leaf litter and great variation in the local tree planting density. This study appears to be the first attempt to characterise the relations existing between orchard design and management practices and the functioning of Sahelian fruit-based agroecosystems thereby furthering the goal of providing recommendations for sustainable management strategies.

Keywords: ants, Formicidae, bioindicators, Sahelian agroecosystem, mango and citrus-based orchards, Senegal, sustainable agriculture.

III.3 Introduction

Agricultural activities are responsible for most landscape degradation, including the loss of plant and animal biodiversity. The simplification and destruction of natural habitats in agroecosystems are usually the main factors of such landscape degradation (Matson et al., 1997;

Altieri, 1999; Benton et al., 2003; Burel et al., 2013). According to Philpott and Armbrrecht (2006), intensive agricultural practices accelerate the loss of biodiversity. Changes in vegetation complexity, such as simplification or a decrease in biotic resources, commonly lead to a change in species interactions and ecosystem processes (Tilman et al., 1997; Hooper and Vitousek, 1997) and this can have potentially drastic consequences for ecosystem services. Nowadays, studies of ecosystem functioning are increasingly being used in efforts to promote biodiversity conservation. Examples include studies of the impact of human management practices on ecological processes in cropping systems (Weibull and Östman, 2003). In Senegal, it is known that orchard agroecosystems are very diverse in their varietal composition, their planting design and their management practices (Vannière et al., 2004; Grechi et al., 2013), but no prior study has examined the relations existing between orchard design and management practices and underlying ecological processes.

Biodiversity is known to have important functions in agroecosystems, affecting the stability, productivity, and sustainability of farms (Giller et al., 2009; Vandermeer et al., 2010), and the management of crop resources can have a major impact on the environment (Wardle et al., 2001; Hooper et al., 2005). To reduce that impact, it is necessary to understand the effect of orchard design and management on animal communities, including arthropods.

In Senegalese orchards, it was necessary to identify ecological indicators in order to understand how orchard design and management might impact ecological processes. An ecological indicator can be defined as any species “that demonstrates the impact of a stressor on biota or that monitors longer term stressor-induced changes in biota” (Mcgeorch, 1998). Soil organisms, such as earthworms and ants, are often used as ecological indicators. They play a crucial role in organic decomposition, soil nutrient balancing, soil formation and the renewal of soil fertility (Thomsen et al., 2012; Folgarait, 1998). Ants have been studied in many climate zones (Hoffmann and Andersen, 2003; Perfecto and Armbrrecht, 2003) and have been successfully used as ecological indicators in a wide range of land-use situations (Andersen et al., 2002; Andersen and Majer, 2004). Ant communities have been investigated in studies of land management systems, natural systems, rehabilitation processes and changing agroecosystems (New, 2000). The robustness of ants as ecological indicators has been demonstrated, and is supported by an extensive understanding of their community dynamics in relation to disturbance (Andersen and Majer, 2004; Andersen et al., 2004). Moreover, ants can provide invaluable information, e.g. for detecting (1) invasive species; (2) trends affecting threatened or endangered species, (3) impacts on keystone species and also for (4) evaluating land management actions, and (5) assessing the impact of long-term ecosystem changes in disturbed

habitats. All can be done in a relatively short time and for a low cost (Underwood and Fisher, 2006). Ant communities have been shown to respond quickly to changes in vegetation stages (Wike et al., 2010). In addition, ants are good biodiversity indicators because their diversity is representative of overall diversity and the assemblage composition of other groups, and can be characterised in a specified area relatively quickly and easily (Majer et al., 2007).

The consequences of ant activity and diversity for pest and disease control, and thus for agriculture, can be beneficial or detrimental depending on the local context and the identity of the ants. High ant activity has a top-down effect reducing communities of herbivorous arthropods in agroforest systems (Philpott and Ambrecht, 2006; Philpott et al., 2004). This is particularly true for dominant ants that have a marked predatory behaviour. However, high ant activity can also reduce communities of predatory arthropods (James et al., 1999), and thus be detrimental to agriculture. A beneficial effect of ant diversity on pest control is not well established, but is expected because, for instance, the more diverse a community is, the more chances it has of including a predator of a particular pest (Philpott and Ambrecht, 2006; Grove, 2007).

No prior studies have examined ant communities in Senegalese orchards. The agroecosystems, which are in the semi-arid climatic zone, possibly require specific ecological indicators that differ from those used in temperate or tropical zones. Thus, our aim was to identify representative ant communities, if any, in a wide range of Senegalese orchard types and then find out whether ants in general or specific ant species could be used as bioindicators of the impact of orchard design and management on their diversity, richness and community composition. To do this, we tested the hypotheses that ant diversity, ant richness and ant community composition are related to (i) orchard design and (ii) human management practices in orchard agroecosystems.

III.4 Materials and methods

III.4.1 Study area

The study was carried out in 49 orchards which were widely dispersed across the whole study area, were easily accessible and encompassed the diversity of orchard design and management found within the study area. They were located in four localities: ‘Notto’, ‘Ndoyenne’, ‘Pout’ (Pout town and Pout sigelec) in the *Niayes* region and ‘Thiès’ (Thiès East and Thiès West) in *Plateau de Thiès* region (Figure 9).

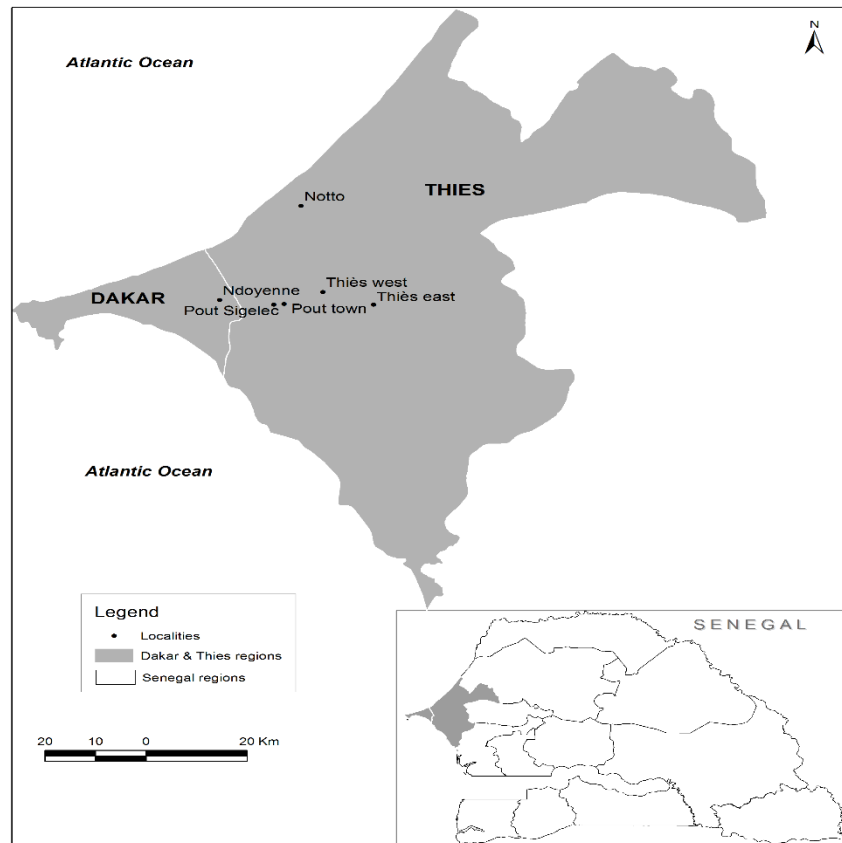


Figure 9: Map of the study area in the Niayes and Plateau de Thiès regions, Senegal

The two regions belong to the same semi-arid agroecological zone. The favourable climate mitigated by a cool and humid trade wind during the hot season makes the regions the major fruit and vegetable production areas of Senegal. Both regions are characterized by ferralic arenosols and a Sudano-Sahelian climate with unimodal rainfall from July to September (between 600 mm and 750 mm per year between 2008 and 2012). ‘Ndoyenne’ and ‘Notto’ benefit from oceanic winds that lower the ambient temperature for longer periods than in ‘Pout’ and ‘Thiès’.

III.4.2 Orchard sample and characterisation of orchard types based on design and management practices

In a previous study carried out on 64 orchards sampled within the *Niayes* and *Plateau de Thiès* regions, an orchard typology was built based on 26 variables describing orchard design and management practices (Grechi et al., 2013). Orchard typology was obtained by a Hierarchical Multiple Factor Analysis (HMFA) performed on the variables of the ‘orchard design’ and ‘orchard management’ groups (Table 3.1). This HMFA was followed by an Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC) with the Euclidean distance metric and Ward’s agglomeration

method. It resulted in four main orchard categories. These orchards were also characterized with seven additional variables classed in a third group regarding ‘orchard vegetation state’ (Table 6).

Table 5: List and definition of all the variables of the ‘orchard design’, ‘orchard management’ and ‘vegetation state’ groups used to describe the orchards. The asterisk indicates the variables used in the ant diversity and richness and RDA analyses. For details on the variables, see Grechi et al., 2013

Sub-groups	Variables	Definition (unit)
Group 1. Orchard design		
Acreage	Acreage	Orchard acreage (ha)
Tree richness	*Tree richness	Number of tree species (called “Species” in Grechi et al. 2013)
Density	*Density	Mean local planting density of trees (ha ⁻¹)
DensityCV	*DensityCV	Coef. of variation of the local planting densities of trees
Cultivar	Cultivar	Number of mango cultivars
% Species		Orchard composition of tree species
	Mango	% of trees of mango species
	Orange	% of trees of orange species
	Grapefruit	% of trees of grapefruit species
	Mandarin	% of trees of mandarin species
	Lemon	% of trees of lemon species
	Papaya	% of trees of papaya species
	Guava	% of trees of guava species
	OtherFruit	% of trees of less frequent species
%Cultivar		Orchard composition of mango tree cultivars
	Kent	% of mango trees of cv. Kent
	Keitt	% of mango trees of cv. Keitt
	BDH	% of mango trees of cv. Boucodiékhhal (BDH)
	DBG	% of mango trees of cv. Dieg bou gatt (DBG)

	Séwé	% of mango trees of cv. Séwé
	OtherMango	% of mango trees of less frequent cultivars
Group 2. Orchard management		
Pasture	*Pasture	Level of secondary use of the orchard for pasture by ruminants
OtherCrop	*OtherCrop	Level of secondary use of the orchard for cultivation of associated food or vegetable crops
Irrigation	*Irrigation	Irrigation intensity based on the amount of water supplied and mechanization level
SoilCare	*SoilCare	Shallow tillage and/or mechanical weeding for soil care
Pesticide	*Pesticide	Application frequency of natural or synthetic pesticides
Fertilization	*Fertilization	Fertilization intensity based on the amount and form of N supplied
FruitPicking	FruitPicking	Picking up frequency of fallen fruits for preventive fruit fly control
Group 3. Orchard vegetation state		
Mortality	Mortality	Mortality rate of trees
Height	*Height	Mean height of living trees (m)
HeightCV	HeightCV	Coef. of variation of the heights of living trees
Vigour	*Vigour	Mean vigour index of living trees
Cover	*Cover	Mean local ground coverage by the tree canopy (%)
CoverCV	*CoverCV	Coef. of variation of the local ground coverage by the tree canopy
Litter	*Litter	Mean litter abundance index of trees

These variables (third group) were not used for the cluster analysis but to describe the categories instead. Of the 49 orchards analysed in the present study, we used 31 from the previous study (we could not use the 64 for logistical reasons) and we added 18 new ones in order to have approximately the same number of orchards for each locality. Orchard categories for the

remaining 18 new orchards were defined based on a same approach. For these additional orchards, HMFA was performed on the variables of the ‘orchard design’ and ‘orchard management’ groups. Then, the 18 additional orchards were assigned to the category for which the Euclidian distance between orchard coordinates and the category barycentre was minimal on the principal components of the HMFA.

The four orchard categories resulting from the HMFA and AHC analyses were: (1) ‘No-input mango diversified orchards’, (2) ‘Low-input mango orchards’, (3) ‘Medium-input citrus-predominant orchards’ and (4) ‘Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards’.

Types 1 and 2 consisted of orchards with a large proportion of mango trees (86% on average), and a high diversity in mango cultivars for those of type 1. They were mostly planted with polyembryonic mango cultivars, such as cv Boucodiékhall, and were dedicated to the local market or subsistence production. None of the type 1 orchards was managed or supplied with water, fertilizers and pesticides. The type 2 orchards displayed only low management levels. Vegetation in the type 1 orchards was dense. Type 3 consisted of orchards with a large proportion of citrus trees (65% on average), including grapefruit, orange and mandarin species, and a high diversity of tree species. Corossol, papaya, banana, guava and sapodilla were other species planted in these orchards, but citrus and mango trees formed the main crops. The planting density was high on average but tree spacing was irregular within the orchards. All orchards were irrigated and fertilized. Type 4 consisted of large orchards with a low diversity of tree species, and mango cultivars, and a regular tree spacing. Kent was the main cultivar followed by cv. Keitt. Most of them were mango mono-specific orchards whereas the others were citrus-predominant mixed orchards. They displayed the highest management levels in comparison with those of the others types. Mango mono-specific orchards of type 4 were dedicated more to the export market.

III.4.3 Ant sampling

Ants in each orchard were sampled in 2012, once during the dry period (March to June) and once during the rainy period (July to September). For each period, twenty pitfall traps per orchard were distributed within all microhabitats (sun-exposed habitats, shaded habitats and hedges). The traps were made of plastic pots (diameter 7.5 cm; height 8 cm), buried in the soil with their opening at soil level and half filled with soapy water. The traps remained in the field for 48 hours. Collected ants were first sorted into morphospecies groups. Then, representative

samples of morphospecies groups were assigned to species by Dr. Brian Taylor (using his on-line resource, "The Ants of (sub-Saharan) Africa"¹).

III.4.4 Relations between orchard characteristics and ant diversity and richness

As there were no missing traps, the Shannon diversity index (α -diversity) was calculated for each orchard using the total number of pitfall traps containing a given species (out of the 40 collected pitfalls) as the measure of ant species abundance in the focal orchard. Ant richness, which amounts to the number of species in each orchard was also determined. Variations in ant richness and diversity between the four orchard types were tested with a Kruskal-Wallis test. A Kruskal multiple test was used to separate factor modalities when a significant effect was detected. The relation between orchard characteristics relative to orchard design, management practices and vegetation state (i.e. Tree richness, Density, DensityCV, Pasture, Irrigation, SoilCare, Pesticide, Fertilization, Vigour, Height, Cover, CoverCV, OtherCrop and Litter; see definition in Table 3.1) on ant diversity and richness was tested using the Generalized Linear Model (GLM) with Gaussian error distribution followed by a type-II analysis of the deviance with a F test. These 14 variables were chosen because the others were unlikely to influence ant biodiversity. These selected variables characterized vegetation structure and human management practices in orchards.

III.4.5 Characterization of orchard types based on ant communities

A typology of the 49 orchards was also built using the composition of the ant communities. As there were no missing traps, the abundance of each ant species in each orchard was computed as the total number of pitfall traps that contained the species. This typology and all other following analyses for ants were performed on data pooled for the two sampling periods in order to obtain a more accurate characterisation of the ant community of each orchard. We computed a Bray-Curtis dissimilarity matrix on log-transformed abundance data and we built a dendrogram of the orchards based on Bray-Curtis pairwise distances using Ward's agglomeration method.

¹ <http://antsofafrica.org/>, revised and re-launched September 2013 and archived by the UK Web Archive <http://www.webarchive.org.uk>).

III.4.6 Relationships between orchard characteristics and ant community composition

We first tested the congruence between orchard typologies based on the ant community and design and management practices using a Fisher exact test on a contingency table of the two orchard typologies.

Then, a Redundancy Analysis (RDA), which is a method combining regression and a Principal Component Analysis, was performed to visualize the relation between the composition of the ant community and the 14 selected variables (i.e. Tree richness, Density, DensityCV, OtherCrop, Irrigation, Pesticide, Fertilization, SoilCare, Cover, CoverCV, Vigour, Height, Pasture and Litter, Table 6). These variables were the same as those used in the GLM analysis and were selected for the same reason. Hellinger transformation was applied to ant abundances for use in the RDA. As rare species can mislead interpretation of RDA results, we removed species detected in fewer than 10 pitfall traps over the 1,960 sampled (49 orchards \times 2 seasons \times 20 pitfalls/orchard/season). This choice of 10 pitfalls was discretionary and depended on the consideration the collector gave to a rare species in the prospected area. Treatment of rare species is problematic because they can strongly influence the results of the analysis without being related to an effect of the environment on the communities.

All the statistical tests, models and figures were carried out with R statistical software (R Development Core Team, 2011). The “FactomineR” R package (Husson et al., 2011) was used to build the typology based on orchard design and management practices. The “vegan” R package (Oksanen et al., 2011) was used to compute and build the dendrogram clustering the orchards based on the ant community and to perform the RDA analysis.

III.5 Results

III.5.1 Species richness and composition of ant samples

In all, 73,594 ants (43,296 in the dry period and 30,298 in the rainy period) belonging to 49 species, 21 genera and 7 subfamilies were collected. Some species of the same genus were however merged because it was too difficult to separate them in the pitfall samples (these species are identified with a same species code in Table 7). It led us to consider only 44 morphospecies for analysis. The most diverse subfamilies were Myrmicinae (27 species) followed by Formicinae (11 species), Ponerinae (5 species), Dolichoderinae (3 species) and Pseudomyrmecinae, Dorylinae, Cerapachyinae (1 species). The genera *Pheidole*, *Monomorium*, and *Tetramorium* showed the highest species richness (8, 7, and 5 respectively) whereas other

genera comprised only 1-4 species. Among the 44 morphospecies, nine were considered as “rare” species (i.e. they were detected in fewer than 10 pitfall traps out of the total dataset).

Table 6: List of ant species collected in the 49 orchards in the dry and rainy periods in 2012. Species code is the code for the morphotypes used in statistical analyses

Subfamily	Species code	Species	Rare species
Cerapachyinae	<i>Cer</i>	<i>Cerapachys longitarsus</i> (Mayr, 1879)	X
Dolichoderinae	<i>Tap</i> <i>Tap</i> <i>Tec</i>	<i>Tapinoma demissum</i> Bolton, 1995 <i>Tapinoma melanocephalum</i> (Fabricius, 1793) <i>Technomyrmex senex</i> Bolton, 2007	
Dorylinae	<i>Dor</i>	<i>Dorylus aegyptiacus</i> Mayr, 1865	
Formicinae	<i>Cam_ves</i> <i>Cam_ser</i> <i>Cam_oas</i> <i>Cat</i> <i>Cat</i> <i>Lep_ach</i> <i>Lep_lae</i> <i>Oec</i> <i>Par</i> <i>Tal_sim</i> <i>Tal_nsp</i>	<i>Camponotus vestitus</i> F Smith, 1858 <i>Camponotus sericeus</i> Fabricius, 1798 <i>Camponotus oasis</i> Forel, 1890 <i>Cataglyphis abyssinica</i> Forel, 1904 <i>Cataglyphis savignyi</i> Dufour, 1862 <i>Lepisiota acholli</i> Weber, 1943 <i>Lepisiota laevis</i> Santschi, 1913 <i>Oecophylla longinoda</i> (Latreille, 1802) <i>Paratrechina longicornis</i> (Latreille, 1802) <i>Tapinolepis simulans</i> Santschi, 1908 <i>Tapinolepis</i> sp	
Myrmicinae	<i>Car</i> <i>Cre_bru</i> <i>Cre_coe</i> <i>Cre_sen</i> <i>Cre_kne</i> <i>Mer</i> <i>Mes</i> <i>Mon_are</i> <i>Mon_bic</i> <i>Mon_dak</i> <i>Mon_mt4</i> <i>Mon_mt4</i> <i>Mon_sal</i> <i>Mon_von</i> <i>Phe_aeb</i> <i>Phe_beq</i> <i>Phe_mt2</i> <i>Phe_mt2</i> <i>Phe_mt2</i> <i>Phe_meg</i> <i>Phe_ter</i> <i>Phe_wel</i> <i>Tet_ang</i> <i>Tet_sim</i>	<i>Cardiocondyla emeryi</i> Forel, 1881 <i>Crematogaster brunneipennis</i> André, 1890 <i>Crematogaster coelestis</i> Santschi, 1911 <i>Crematogaster senegalensis</i> Roger, 1863 <i>Crematogaster kneri</i> Mayr, 1862 <i>Meranoplus magretti</i> André, 1884 <i>Messor galla</i> Mayr, 1904 <i>Monomorium areniphilum</i> Santschi, 1911 <i>Monomorium bicolor</i> Emery, 1877 <i>Monomorium dakarensis</i> Santschi, 1914 <i>Monomorium oscaris</i> Bolton, 1987 <i>Monomorium osiridis</i> Santschi, 1915 <i>Monomorium salomonis</i> (Linnaeus, 1758) <i>Monomorium vonatu</i> Bolton, 1987 <i>Pheidole aeberlii</i> Forel, 1894 <i>Pheidole bequaerti</i> Forel, 1913 <i>Pheidole andrieui</i> Santschi, 1930 <i>Pheidole mentita</i> Santschi, 1914 <i>Pheidole rugaticeps</i> Emery, 1877 <i>Pheidole megacephala</i> (Fabricius, 1793) <i>Pheidole termitophila</i> Forel, 1904 <i>Pheidole welgelegensis</i> Forel, 1913 <i>Tetramorium angulinode</i> Santschi, 1910 <i>Tetramorium simillimum</i> F Smith, 1851	X X X X X X X

	<i>Tet_ser</i> <i>Tet_mus</i> <i>Tet_rot</i>	<i>Tetramorium sericeiventre</i> Emery, 1877 <i>Tetramorium muscorum</i> Arnold, 1926 <i>Tetramorium rothschildi</i> Forel, 1907	
Ponerinae	<i>Ano_beq</i> <i>Ano_rot</i> <i>Ano_sed</i> <i>Bra</i> <i>Pal</i>	<i>Anochetus bequaerti</i> Forel, 1913 <i>Anochetus rothschildi</i> Forel, 1907 <i>Anochetus sedilloti</i> Emery, 1884 <i>Brachyponera sennaarensis</i> (Mayr, 1862) <i>Paltothyreus tarsatus</i> (Emery, 1899)	X X
Pseudomyrmicinae	<i>Tetp</i>	<i>Tetraponera claveau</i> Santschi, 1913	X

III.5.2 Relations between orchard characteristics and ant diversity and richness

Ant richness was significantly different across orchard types based on orchard design and management practices ($\chi^2 = 10.02$; $df = 3$; $P < 0.05$; Figure 10A). Ant diversity followed the same trend as ant richness but differences between the orchard types were only marginally significant ($\chi^2 = 7.58$; $df = 3$; $P = 0.055$; Figure 10B). Orchards of type (3) ‘Medium-input citrus-predominant orchards’ displayed the greatest ant diversity and ant richness out of the four orchard types, while orchards of type (4) ‘Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards’ displayed the lowest values. Ant diversity and ant richness were at intermediate levels in orchards of types (1) and (2).

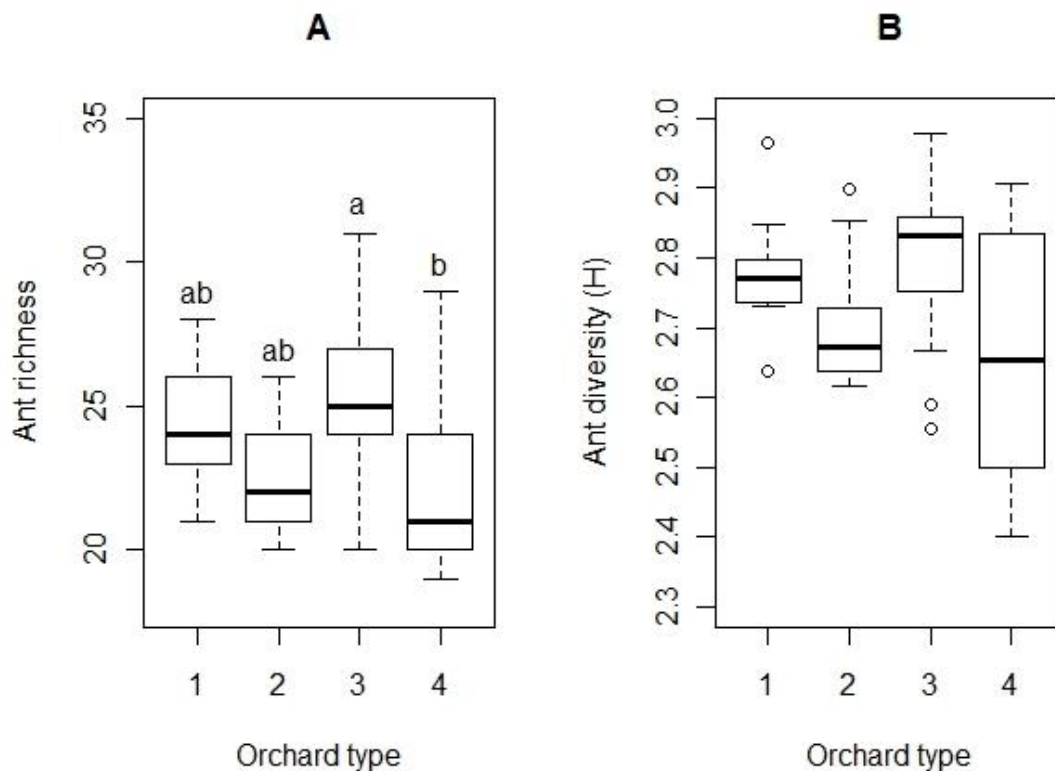


Figure 10: Ant richness (A) and ant diversity (B) in the four orchard types: (1) “No-input mango diversified orchards”, (2) “Low-input mango orchards”, (3) “Medium-input citrus-predominant orchards” and (4) “Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards”. Orchard types with different letters are significantly different (Multiple comparison test after Kruskal-Wallis test; $P < 0.05$)

When considering only orchards of types (3) and (4) and classing these orchards according to their main tree species, it appeared that ant diversity and ant richness were greater in citrus-based orchards than in mango-based orchards, but the differences were only marginally significant (Figure 11; $\chi^2 = 3.38$; $df = 1$; $P = 0.06$ for ant richness and $\chi^2 = 3.15$; $df = 1$; $P = 0.07$ for ant diversity).

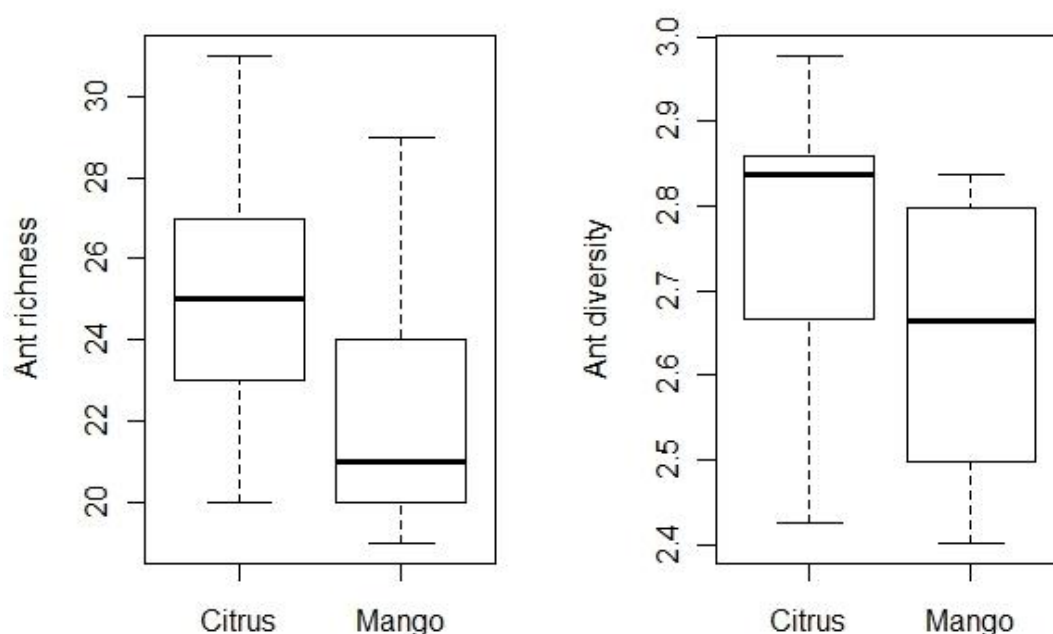


Figure 11: Variation in ant richness and ant diversity depending on the main crop in the type 3 and type 4 orchards located in the localities of Ndoyenne and Notto. Citrus orchards were continuously irrigated and Mango orchards were only irrigated for five months (January to May)

The GLM tests on the 14 variables indicated that tree richness and pesticides had significant effects on ant richness ($F = 8.04$; $df = 1$; $P < 0.01$ and $F = 3.29$, $df = 1$, $P < 0.05$ respectively). In addition, soil care showed a marginal significant effect on ant richness ($F = 3.29$; $df = 1$; $P = 0.08$). Tree richness showed a significant effect on ant diversity too ($F = 4.96$; $df = 1$; $P < 0.05$). Ant richness and diversity increased with tree richness, whereas ant richness tended to decrease

when moving from orchards where there was not soil care to orchards treated with shallow tillage and/or mechanical weeding of soil (Figure 12).

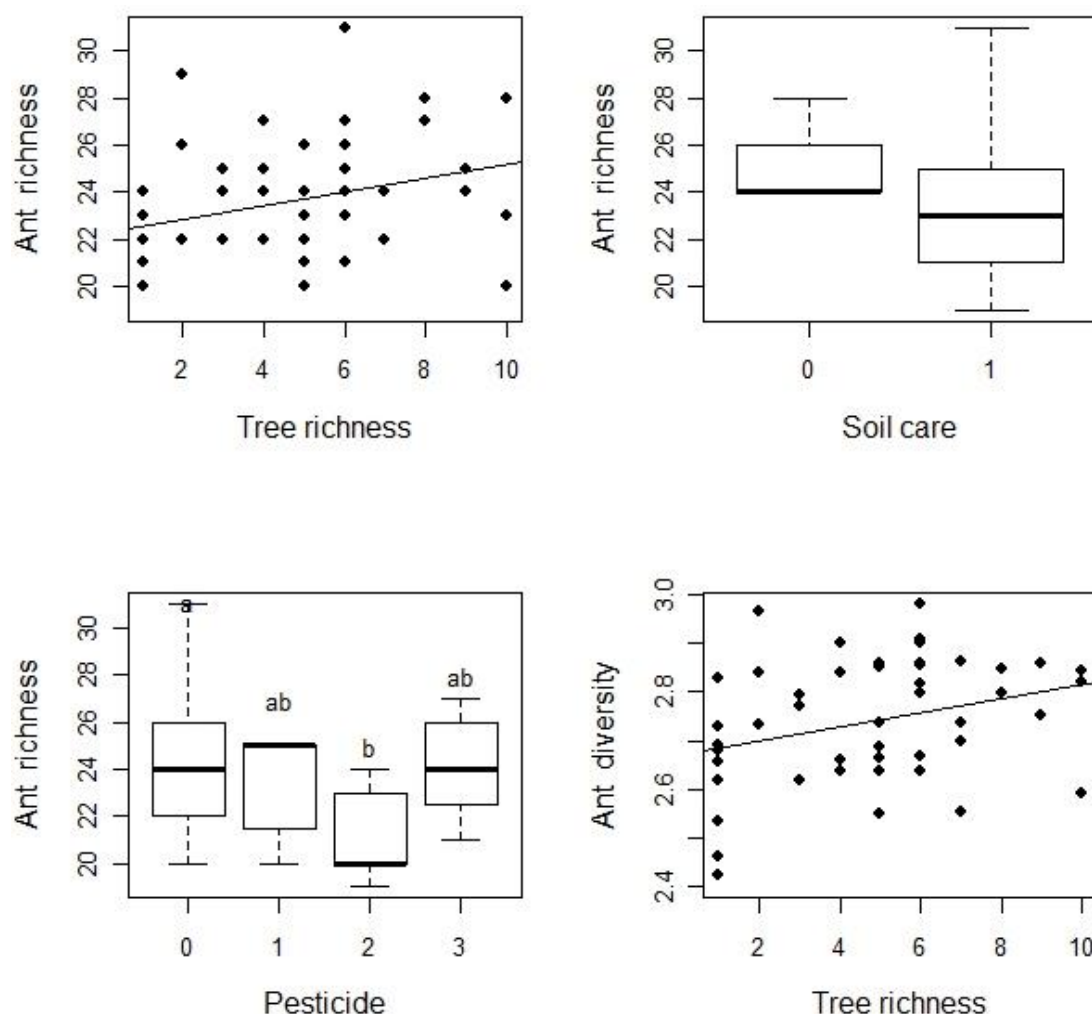


Figure 12: Relations between ant richness, ant diversity and two variables relative to orchard design (tree richness) and management practices (soil care: 0 = no soil care, 1= shallow tillage and/or mechanical weeding of soil; pesticide: 0 = no pesticide, 1 = 1 to 2 applications per year, 2 = 3 to 5 applications per year, 3 = more than 5 applications per year)

III.5.3 Relations between orchard characteristics and ant community composition

The results for the categorization of orchards based on orchard design and management practices led to the 49 orchards being classed in 9 orchards of type (1), 14 of type (2), 14 of type (3) and 12 of type (4).

The results for the categorization of orchards based on ant community composition revealed four groups: (A), (B), (C) and (D) composed of 22, 11, 8 and 8 orchards respectively (Figure 13).

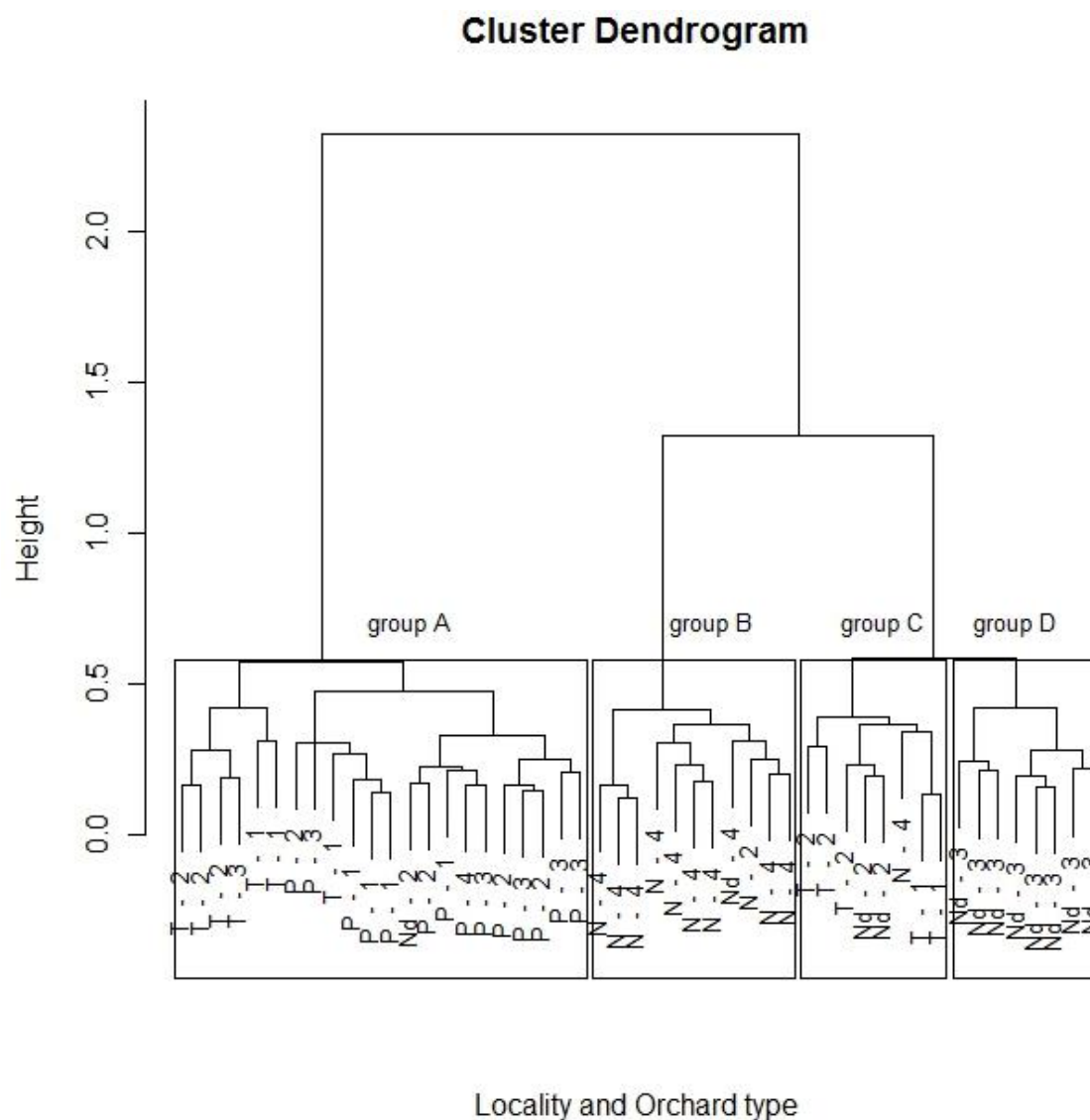


Figure 13: Dendrogram clustering the Senegalese orchards in four groups (A, B, C and D) according to resemblances in their ant community composition. The orchard label is composed of letters indicating the localities in which the orchard is located (T=Thiès, P=Pout, N=Notto, Nd=Ndoyenne), followed by a number standing for the orchard type according to the typology based on orchard design and management practices: (1) ‘No-input mango diversified orchards’, (2) ‘Low-input mango orchards’, (3) ‘Medium-input citrus-predominant orchards’ and (4) ‘Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards’

A comparison of ant species composition between orchard groups is shown in figure 14. Group (A) was dominated by *Monomorium bicolor* (Mon_bic), followed by *Camponotus oasium* (Cam_oas), and *Tetramorium sericeiventre* (Tet_ser). Group (B) was dominated by *Pheidole aeberlii* (Phe_aeb) followed by *Monomorium salomonis* (Mon_sal). Group (C) was dominated by *Monomorium bicolor* followed by *Pheidole aeberlii*, *Tetramorium sericeiventre*, and *Monomorium* spp (Mon_mt4). Group (D) was dominated by *Tetramorium sericeiventre* followed by *Pheidole aeberlii* and *Pheidole termitophila* (Phe_ter).

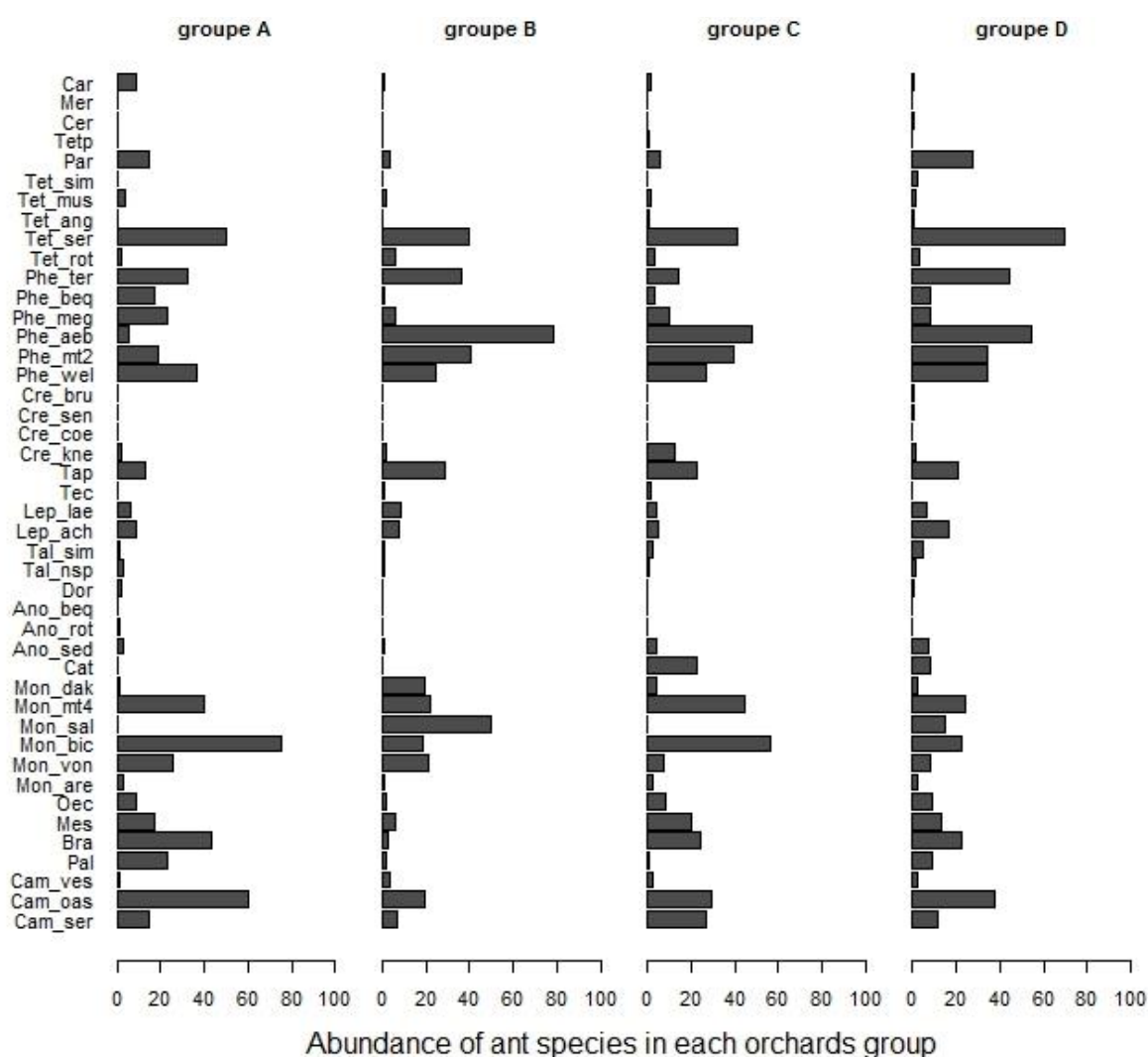


Figure 14: Abundances of ant species in the four orchard groups (A), (B), (C) and (D) that were defined according to resemblances in their ant community composition. Values are the % of pitfalls in which a species was present out of the total number of pitfalls collected in all the orchards of the groups during the dry and rainy periods (i.e., 880, 440, 320 and 320 pitfalls in groups (A), (B), (C) and (D) respectively). For full names of ant species see Table 7.

The two typologies of orchards based on ant community and design/management practices were significantly congruent (Fisher exact test: $P < 0.001$). Two groups of orchards were very characteristic: Group (B), which was composed of 90.9% type (4) orchards and Group (D) composed of 100% type (3) orchards (Figure 13). The other two groups, (A) and (C) did not show any specific orchard composition. Group (A) was composed of type (1) (31.8%), type (2) (36.3%) and type (3) (27.2%) orchards. Group (C) was composed of type (2) (62.5%), type (1) (25%) and type (4) (12.5%) orchards. The ant community was also significantly linked to the localities (Fisher exact test: $P < 0.001$). Groups (B) and (D) were composed of 90.9% and 100% orchards from Notto and Ndoyenne, respectively. In group (A), 63.3% of the orchards were located in Pout and 31.8% in Thiès. Group (C) comprised 62.5% of orchards from Thiès, 25% from Ndoyenne and 12.5% from Notto.

A redundancy analysis on all the orchards showed a relatively good adjustment model (adjusted $R^2 = 0.31$, meaning that 31% of the variability was explained by the model and 69% was not redundant), and the overall test was significant (10,000 permutations test on factorial axes, $P < 0.001$), indicating a relationship between the ant community and orchard characteristics. The first five axes of the RDA were significant (10,000 permutations on factorial axes), with 15% of the total variance explained by the first axis and 19% by the first two axes. The correlation plot of the design, management and vegetation state variables, ant species and orchard types with respect to the first two RDA axes, is shown in figure 15.

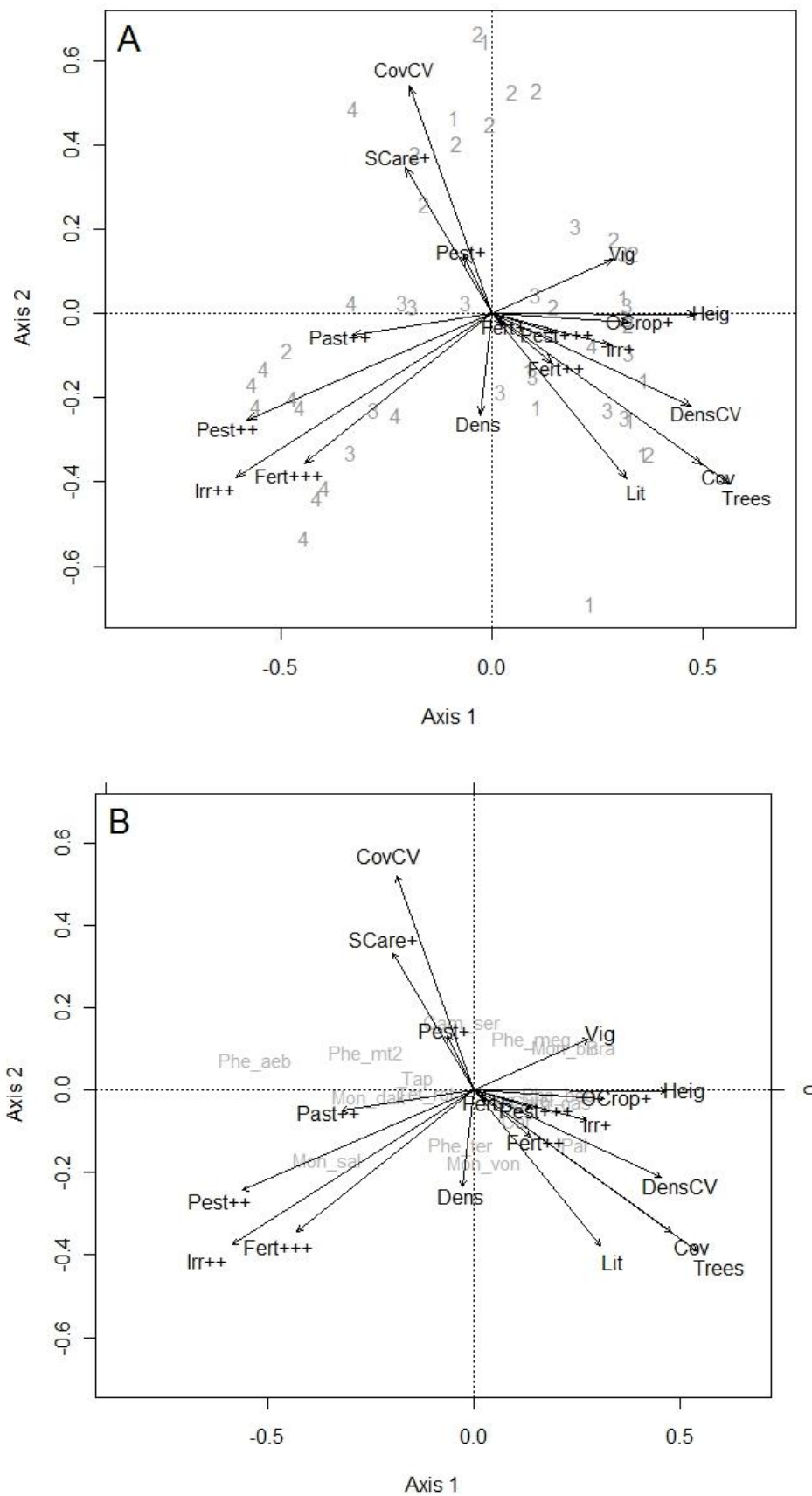


Figure 15: Correlation plot of orchard design, management and vegetation state variables (arrows) and either orchard types (numbers in grey) (A) or ant morphotypes (grey) (B) with respect to the first two

Redundancy Analysis (RDA) axes. For clarity, ant morphotypes with coordinates < 0.1 on axes 1 and 2 have been removed.

Abbreviations for design, management and vegetation state variables mean Density (Dens), DensityCV (DensCV), Cover (Cov), CoverCV (CovCV), SoilCare (SCare), Pesticide (Pest), Fertilization (Fert), Irrigation (Irr), OtherCrop (OCrop), Litter (Lit), Tree richness (Trees), Vigour (Vig), Height (Heig), Pasture (Past).

Code for level of management practice:

SCare: (-) = no soil care, (+) = shallow tillage and/or mechanical weeding of soil)

Pest: (-) = no pesticide, (+) = 1 to 2 applications per year, (++) = 3 to 5 applications per year, (+++) = more than 5 applications per year.

Fert: (-) = no fertilizer, (+) = under 0.5 kg of N/year/tree only with manure, (++) = under 0.5 kg of N/year/tree in manure and/or mineral fertilizer, (+++) = over or equal to 0.5 kg of N/year/tree in manure or mineral fertilizer.

Irr: (-) = no irrigation, (+) = watering less than or equal to 200 l/tree/week, (++) = watering over or equal to 200 l/tree/week.

OCrop: (-) = no secondary use of orchard for other crops (food crop or market gardening), (+) = secondary use of orchard for other crops (food crop or market gardening).

Past: (-) = no pasture, (+) = occasionally or isolated animals, (++) = regular or flock.

Three groups of variables were individualized in the RDA plot: one group formed by pesticide use, fertilization and irrigation, one group formed by the level of litter, tree richness, local ground coverage by the tree canopy and the coefficient of variation of the planting density and another group formed by soil care and coefficient of variation of local ground coverage by the tree canopy. The variable called Cover indicates the overall ground coverage of the orchard by the tree canopy and not by mulch. Vigour was opposed to the first group of cited variables. The scatter of the orchards on the first two axes was mainly explained by these groups of variables (Fig. 15A). *Monomorium salomonis* (Mon_sal) was closely associated with high irrigation, fertilization and pesticide use. Conversely, *Brachyponera sennaarensis* (Bra), *Monomorium bicolor* (Mon_bic) and *Pheidole megacephala* (Phe_meg) were negatively associated with these variables but rather associated with vigour. *Camponotus sericeus* (Cam_ser), *Cataglyphis* spp (Cat) and *Crematogaster kneri* (Cre_kne) were associated with high variation in of soil coverage by the tree canopy (CoverCV). *Paltothyreus tarsatus* (Pal) was associated with tree richness, abundant leaf litter and plenty of shade (Fig. 15B).

III.5.4 Discussion and conclusion

Ant diversity, ant richness and relations with orchard type

The ant richness in mango and citrus orchards in Senegal proved to be comparable to that found in other African agroecosystems. For instance, Kone et al. (2014) in Ivory Coast identified 43, 52, 57 and 73 species in four different cocoa agroecosystems. Tadu et al. (2014) in Cameroon identified 52, 53 and 61 species in three cocoa agroecosystems. Murnen et al. (2013) found 39 and 65 species from respectively low-shaded and high-shaded coffee in two American agroecosystems (Mexico).

Our results demonstrated that there is a link between ant biodiversity and orchard type characterized by design and management practices. Both ant diversity and richness varied depending on the orchard type. Type (4) orchards, which displayed higher intensification levels with a less diversified set of trees (Grechi et al., 2013), had the lowest ant diversity and richness. On the other hand, type (3) orchards, with the greatest tree richness, planting densities and variation in local planting density (Grechi et al., 2013), had the greatest ant diversity and richness. These results confirm previous studies showing the frequent increase in ant diversity and richness observed in heterogeneous landscapes (Ribas et al., 2003, Hill et al., 2008; Pacheco and Vasconcelos, 2012; De la Mora et al., 2013) and their decline in landscapes subject to high management intensity (Ribas and Shoereder, 2007; House et al., 2012). The greatest tree richness and coefficient of variation for the local planting density observed in the type (3) orchards created microenvironmental diversity generated by the existence of empty spaces and plant-mosaic portions in those orchards. A heterogeneous planting density in the orchards may have offered refuge to both shade-tolerant species and open ground-tolerant species (Reyes-Lopez et al., 2003), explaining the greater ant richness and diversity than in orchards with uniform planting density observed in our study, in a Mexican desert (Bestelmeyer and Schooley, 1999) and in Mediterranean pasturelands (Reyes-Lopez et al., 2003). Perfecto and Vandermeer (1996) showed the effects of microclimatic differences on ant diversity in coffee agroecosystems. Equally, the difference in ant diversity and richness observed between citrus and mango orchards might be explained by microclimatic differences in citrus and mango orchards. It is likely that they differed in moisture availability, since citrus trees were irrigated throughout the year, while the mango-based orchards were only irrigated for approximately four months (from flowering to the early rainy season).

Ant community structure depending on the locality and the orchard type

In our study, ant communities were related to the locality and the orchard type. The previous study by Grechi et al. (2013) in the same agroecosystems showed a close relation between the locality and the orchard type. A causal link between the climatic parameters of localities and orchard type is unlikely because the design and management of orchards in the same study zone were mainly based on historical, sociological and economic choices rather than on environmental grounds (Vannière et al., 2004). The association between ant communities and locality may thus simply result from the relationship that we found between orchard type and ant community. Alternatively, it may be due to environmental variation across localities. Indeed, large-scale geographical variables (latitude, longitude and elevation) and small-scale site variables (habitat area, vegetation composition, microclimate and light availability) are both factors reported as being able to affect ant diversity and/or richness (Gotelli and Ellison, 2002).

The ant communities of groups (B) and (D) were very typical of type (4) and type (3) orchards, respectively. The type (3) orchard associated with the Ndoyenne locality were dominated by citrus trees, which require a high level of watering and are irrigated continuously, while those of type (4), associated with Notto, were dominated by mango trees, which are only irrigated for a short period in the year. In such a situation, microclimatic conditions, which vary with irrigation regimes, can be indexed as potential factors involved in differences in ant communities. We put forward our hypothesis based on several studies that had already reported that ecosystem microclimates have an influence on ant community structures (Perfecto and Vandermeer, 1996; Retana and Cerdá, 2000; Castracani et al., 2010; Rosado et al., 2013). In the same way as it influences ant diversity and richness, moisture is an important factor in the of ant communities composition. Levings (1983) demonstrated the importance of soil moisture in structuring ant communities either through rainfall or through experimental watering during the dry season. However, in our case study, it was not possible to confirm that the collection of ant species under particular moisture conditions was due to a species preference for such ecological conditions, since the ecology of ant species collected in Senegal is relatively unknown.

A different ant community assemblage was exhibited by group (A). In this case, the influence of limited management practices was more conspicuous since the orchards in the localities of Pout (Pout sigelec, Pout town), and Thiès (Thiès east, Thiès west), which formed this group (mostly type (1) and type (2)) were not subjected to particularly strong farming practices. These orchards were supplying local markets and showed no particular farming programme over the year. This was unlike those of type (4) in the locality of Notto, which grew fruits for the export

market and displayed higher intensification levels (Ndiaye et al., 2012). The weak or non-existent technical interventions in type (1) and type (2) orchards were conducive to high leaf litter levels, no pesticide use and no fertilizer inputs that influenced ant diversity, ant richness or ant community structure, as reported by other studies demonstrating the sensitivity of ants to environmental conditions (Peck et al., 1998; New, 2000; Hernández-Ruiz and Castaño-Meneses, 2006; Torchote et al., 2010; Chen et al., 2011; Wiescher et al., 2012; Bernadou et al., 2013). For the group (A) orchards, one ecological factor able to influence the ant community was the vegetation stratum which determines the amount of leaf litter (Perfecto and Snelling, 1995; Ellison et al., 2002; Boulton et al., 2005), depending on whether or not there was orchard cleaning. We found that such orchards registered high levels of leaf litter due to a lack of cleaning practices.

The characteristic association between orchard type and some ant species strongly suggests that farming practices influence ant communities. The association of *Monomorium salomonis* with management variables such as pesticides, irrigation and fertilizers that are abundantly applied in type (4) orchards supports this finding. Indeed, this species is highly anthropophile and withstands a high level of environmental disturbance. In such a habitat, it is competitive and potentially dominant. Other species, such as *Camponotus sericeus*, *Cataglyphis abyssinica*, *Cataglyphis savignyi* and *Crematogaster kneri* showed a preference for open areas by virtue of their relative association with orchards having a high coefficient of variation for local ground coverage by the tree canopy. *Paltothyreus tarsatus* typified species found in orchards with greater tree richness, high local ground coverage by the tree canopy, more leaf litter and a large variation in local tree planting density, i.e. orchards with limited cleaning practices. This combination favoured ponerine ants such as *Paltothyreus tarsatus*, which is a forest or forest-savannah transition species foraging in the leaf litter. This ant species was very characteristic of group (A) orchards and might indicate orchards with high availability of ecological resources.

Our study confirmed the hypothesis that orchard design and management practices affect ant richness, ant diversity and ant community composition. It supported the concept that ecosystem diversity is a key element in biodiversity conservation (Petal, 1971; Dahms et al., 2005; Rizali et al., 2013). The study is relevant also in showing the way in which orchard design and management practices can affect ant diversity and composition even if the contrasts are less distinct compared to those usually found between open areas and forestry patches (Urrutia-Escobar and Armbrrecht, 2013). In the same way as in temperate and tropical climatic regions,

where the potential of ants to be used as biological and ecological indicators has already been demonstrated, ants can also be used similarly in the Sahelian regions. In Senegalese fruit-based agroecosystems, mainly dominated by mango and *Citrus* fruit crops, we identified two ant species that could be used as ecological indicators. *Monomorium salomonis* was characteristic of intensive agricultural practices that resulted in a high level of environmental disturbance. On the other hand, *Paltothyreus tarsatus* was characteristic of orchards with greater tree richness, high local ground coverage by the tree canopy, more leaf litter and a large variation in local tree planting density. This study is a first step in the development of biological indicators for African agroecosystems and provides evidence that ants may be good candidates.

The main findings from this study are that management practices are very likely to affect ant diversity and ant community structure. Among them, pesticide use, irrigation and fertilizers constitute the more obvious factors affecting ants. Ants are particularly sensitive to pesticides because they are central-place foragers, concentrating resources, and thus, pesticides gathered from a large area, in one point (the nest), and because they exchange food via trophallaxis, thus rapidly spreading pesticides potentially ingested across congeners (Rust et al., 2003), resulting in high mortality (Dong-Hwan and Rust, 2008). An ultimate goal for agroecosystem managers might not necessarily be to favour high ant diversity but rather a set of species that are efficient for crop protection. Integrated Pest Management (IPM) models are examples where low ant diversity, provided that the right species are present, can be beneficial for producers. In recommendations for sustainable farming practices, farmers need to be made more aware of how to control pests in agroecosystems by adopting environment-friendly approaches where environmental parameters involving trophic systems are taken into account (e.g. preservation of beneficial arthropods by reducing pesticide use in agroecosystems).

Acknowledgements We are grateful to the PDMAS organisation which financially supported this research. Thanks also go to the orchard owners for their full collaboration and acceptance of experiments in their orchards. Thanks also to our field assistants (Moustapha Badj, Famara Badj, Christian Ndione and Pierre Ndione) and our laboratory assistants (Ardachir Yasmine and Ablaye Ndour). We are grateful to Diariétou Sambakhé (CERAAS-Thiès) for his advice on statistical analyses. We also thank Peter Biggins for revising the English of the article.

IV. CONCLUSION DU CHAPITRE 3

(1) Les résultats expérimentaux ont permis de :

- **mettre en évidence la capacité des fourmis oecophylles à limiter les infestations de mouches des fruits en milieu semi-aride relativement beaucoup plus chaud et sec (influence de l'Harmattan) comparé aux biotopes avec une pluviométrie abondante et une végétation luxuriante particulièrement affectionnés par ces fourmis.** L'hypothèse de départ d'une possible inefficacité des fourmis oecophylles à limiter les infestations de mouches des fruits dans les biotopes chauds et secs est en effet remise en cause par les résultats de cette étude.
- **montrer que les populations de fourmis *O. longinoda* et de mouches des fruits *B. dorsalis* varient en fonction du type de verger:**
 - *les vergers de type 1 (forte diversité variétale de manguiers, absence d'apports en fertilisants et pesticides, végétation dense) et les vergers de type 3 (forte diversité d'agrumes, végétation dense, irrigation et fertilisation assez importantes, faibles applications de pesticides) ont enregistré les plus fortes abondances de fourmis oecophylles et les plus faibles abondances de mouches des fruits en saison pluvieuse.*
 - *Les vergers de type 4 (très faible diversité végétale et faible diversité variétale de manguiers, plus forts niveaux d'applications de pesticides) ont par contre enregistré les plus faibles abondances de fourmis oecophylles et plus fortes abondances de mouches des fruits (cf. article 1, chapitre 3).*

(2) Les résultats sur la liste synthétique des espèces de fourmis connue pour le Sénégal (richesse importante retrouvée dans les agroécosystèmes fruitiers) ont permis de:

- **considérer la faune de fourmis du Sénégal relativement diversifiée au vu de la superficie du pays, du faible nombre de zones explorées et de la relative faiblesse de l'effort d'échantillonnage réalisé (canopée non explorée).** Cette liste tourne au tour de 93 espèces.
- **signaler 31 espèces collectées au Sénégal par cette étude pour la première fois.**
- **considérer les agroécosystèmes fruitiers des "Niayes" et le "Plateau de Thiès" (avec 51 espèces) comme étant relativement diversifiés en fourmis comparés à d'autres agroécosystèmes à l'échelle de la sous région mais aussi par rapport à d'autres agroécosystèmes en dehors de l'Afrique (cf. discussion article 2, chapitre 3).**

- 43, 52, 57 et 73 espèces ont été listées par exemple dans quatre agroécosystèmes de cacaoyers en Côte d'Ivoire.
 - 52, 53 et 61 espèces ont été listées dans trois agroécosystèmes de cacaoyers au Cameroun.
 - 39 et 65 espèces de fourmis ont été listées dans deux agroécosystèmes de caféiers au Mexique.
- (3) Les résultats d'analyses entre les caractéristiques des vergers et les communautés de fourmis ont permis de:
- **montrer que la biodiversité des fourmis recensée dans les agroécosystèmes varie en fonction de la conception et des pratiques d'entretien des vergers.**
 - *Les vergers de type 1 et 3, soit avec peu ou pas de pratiques culturales intensives, et avec plus de diversité végétale enregistrent plus de diversité de fourmis.*
 - *Les vergers de type 4, avec une très faible diversité végétale, une faible composition variétale de manguiers ou d'agrumes et aux pratiques intensives les plus élevées (applications de pesticides, fertilisations et irrigation) ont les plus faibles diversités de fourmis.*
 - **montrer qu'il y a une relation entre les actes techniques d'entretien des cultures et les communautés de fourmis dans les vergers.**
 - *La forte association entre *Monomorium salomonis* (espèce anthropophile) avec les actes techniques tels que l'application de pesticides, la fertilisation et l'irrigation fortement présents dans les vergers de type 4, renforce l'hypothèse de l'influence des pratiques sur la composition et la structure des communautés de fourmis dans les vergers.*
 - *D'autres espèces comme *Camponotus sericeus*, *Cataglyphis abyssinica*, *Cataglyphis savignyi* et *Crematogaster kneri* montrent une préférence pour les habitats ouverts en vertu de leur relative association avec la forte variation de couverture du sol par la projection de la canopée des arbres.*
 - **Paltothyreus tarsatus* est le type d'espèce beaucoup plus associé à une grande richesse végétale, une couverture du sol par la projection de la canopée des arbres plus importante, une litière abondante et une grande variation de la densité de plantation des arbres.*

La combinaison de tous ces facteurs permet de considérer les deux espèces (*M. salomonis* et *P. tarsatus*) comme bio-indicateurs possibles de situations fonctionnelles extrêmes des vergers définies sur un axe de fonctionnement général des agroécosystèmes fruitiers au Sénégal.

CHAPITRE 4 : Discussions, Conclusions générales et Perspectives

Chapitre 4 : DISCUSSIONS, CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Ce travail a été conduit dans le but d'établir des relations entre le fonctionnement des agroécosystèmes fruitiers, les fourmis et les mouches des fruits au Sénégal. Il se divise en deux parties. Dans un premier temps, nous avons cherché à établir une relation entre l'abondance d'un ennemi naturel (*O. longinoda*), d'un bioagresseur (*B. dorsalis*) et les caractéristiques végétales et fonctionnelles des vergers dans les Niayes et le plateau de Thiès au Sénégal. Nous avons auparavant testé la capacité d'*O. longinoda* à limiter les infestations de mangues par *B. dorsalis*, mais aussi montré l'existence d'une corrélation négative entre ces abondances et leur variation en fonction du type de verger. Dans un second temps, nous avons cherché à établir des relations entre la biodiversité des fourmis (richesse et indice de diversité) et les caractéristiques végétales et fonctionnelles de ces mêmes vergers.

Ainsi, nous discutons dans cette partie de la portée des résultats et des perspectives de cette thèse selon quatre axes:

- (1) La lutte biologique par *O. longinoda* dans les manguiers: un intérêt évident contre les dégâts de mouches des fruits, mais qu'en est-il de la pollinisation du manguiers ?
- (2) La biodiversité des fourmis dans la zone agroécologique étudiée: potentialités fonctionnelles et intérêt pour la lutte biologique,
- (3) Les rôles de la conception et des pratiques d'entretien des vergers sur la structuration des communautés de fourmis,
- (4) La gestion agroécologique des vergers Sénégalais: une possibilité existe-t-elle avec les fourmis parmi les éléments fonctionnels ?

IV.1 La lutte biologique par *O. longinoda*: un intérêt évident contre les dégâts de mouches des fruits mais qu'en est-il de la pollinisation du manguiers ?

La lutte biologique de *B. dorsalis* par *O. longinoda* en milieu semi-aride a pu être montrée à travers les résultats de cette étude. Il a été montré également qu'il y a une corrélation négative entre l'abondance d'*O. longinoda* et celle de *B. dorsalis* (cf. article 1, chapitre 3). Ce type de

résultat atteste de l'importance des fourmis oecophylles en tant qu'agents de lutte biologique et peut pousser les producteurs à changer la perception qu'ils ont de ces espèces dans les agroécosystèmes fruitiers d'autant que leurs abondances sont susceptibles d'être influencées par les pratiques dans les vergers. Du point de vue scientifique, les recherches sur les modes d'action des fourmis oecophylles lors de la lutte biologique ont mis en évidence d'amples connaissances sur la prédation directe (Dejean, 1991 ; Hölldobler and Wilson, 1978 ; Wojtusiak et al., 1995; Vayssières et al., 2015) et l'émission de phéromones (Adandonon et al., 2009; Van Mele et al., 2009, Vayssières et al., 2013; Offenberg, 2014) qui sont les deux principaux mécanismes d'action contre les bioagresseurs.

Perspectives: Le phénomène de la lutte biologique par les fourmis oecophylles trouve beaucoup plus son intérêt dans la production de fruits et légumes. Même si des pistes de comportement à l'égard des fourmis oecophylles ont été étudiées pour leur adoption dans les vergers (Peng and Christian, 2005), il y a néanmoins la persistance d'une interrogation sur les interactions entre ces espèces et d'autres auxiliaires comme les pollinisateurs, notamment leur réel potentiel sur la pollinisation des fleurs du manguier. De nos jours, la situation n'est pas très claire puisque deux cas de figure ont été mis en évidence: Tsuij et al. (2004) se sont aperçus d'une baisse significative des taux de visites des fleurs par des insectes volant dont le pollinisateur majeur du lichi chevelu, *Trigona minangkabau* (Apidae: Meliponinae) alors que Pierre et Idris (2013) ont observé que les fourmis oecophylles ne perturbent pas le pollinisateur du palmier à huile *Elaeidobius kamerunicus* Faust (Coleoptera: Curculionidae). Dans les vergers de la zone étudiée, le manguier, une plante dont la pollinisation dépend des insectes, peut héberger d'abondantes populations de fourmis oecophylles. Il reste encore difficile de prédire l'effet des fourmis oecophylles sur les pollinisateurs du manguier et éventuellement l'impact de la baisse d'accès de ces pollinisateurs du manguier sur le rendement de l'arbre. Pour répondre à ces questionnements et envisager la préconisation d'une lutte biologique par *O. longinoda*, il serait intéressant d'étudier davantage les besoins en pollinisation entomophile du manguier et jusqu'à quel point ses pollinisateurs peuvent être affectés par les fourmis oecophylles sans que cela n'impacte la production.

IV.2 La biodiversité des fourmis dans les Niayes et le plateau de Thiès: potentialités fonctionnelles et intérêt majeur pour la lutte biologique

La faune des fourmis collectées (51 espèces) dans les Niayes et le plateau de Thiès est relativement diversifiée pour un agroécosystème (cf. article 2, chapitre 3). Les fourmis peuvent être des auxiliaires utiles dans la gestion des bioagresseurs grâce aux relations fonctionnelles

multiples qu'elles entretiennent avec les autres éléments biologiques des écosystèmes. L'existence d'auxiliaires pour l'agriculture a toujours été importante pour la durabilité des systèmes agricoles. Dans le cas des communautés de fourmis, les conséquences de leurs activités et de leur diversité dans le contrôle de ravageurs et de maladies peuvent être bénéfiques ou néfastes pour l'agriculture et dépendent du contexte et de l'identité des fourmis. Trois principaux cas de figures sont relativement bien connus:

- soit c'est une forte activité des fourmis qui conduit à de fortes baisses de populations des ravageurs (Philpott et al. 2004, Philpott and Ambrecht, 2006) et par conséquent le phénomène peut être bénéfique pour l'agriculture, et cela est particulièrement vrai quand il s'agit d'espèces dominantes ayant une activité prédatrice très marquée comme la fourmi *O. longinoda*,
- soit c'est une forte activité des fourmis (prédation ou substances repellentes émises) et qui conduit à des baisses de populations d'ennemis naturels (James et al., 1999) et par conséquent ce phénomène est néfaste pour l'agriculture,
- soit c'est une situation où certaines fourmis favorisent la croissance de populations d'insectes bioagresseurs comme les hémiptères par exemple.

Perspectives: En réalité, un effet bénéfique d'une grande diversité de fourmis sur le contrôle de ravageurs n'a pas été établi, mais il est seulement probabiliste. En effet, plus une communauté de fourmis est diversifiée, plus elle a de chance d'inclure un prédateur d'un ravageur particulier (Philpott and Ambrecht, 2006 ; Gove, 2007). Une analyse élargie d'études des activités des fourmis dans des agroécosystèmes (Symondson et al., 2002) a fait état de 79% de cas où les généralistes prédateurs ont contrôlé l'abondance des herbivores et 65% où ils ont contribué à la baisse des dégâts sur les cultures et une hausse des rendements. La zone agroécologique des Niayes et du plateau de Thiès offre des potentialités quant au développement de programme de lutte intégrée (IPM) dans la mesure où des espèces comme *O. longinoda* et *Pachycondyla analis* (maintenant revu sous le nom de *Megaponera analis*) ont la faculté d'exercer un contrôle sur les mouches des fruits (Van Mele et al., 2007; Sinzogan et al., 2008) et les termites (Yusuf et al., 2013; Yusuf et al., 2014) respectivement. Une étude des relations entre la diversité de fourmis et la productivité fruitière se révèle particulièrement importante pour en vue de la détection d'éventuels effets.

IV.3 Les rôles de la conception et des pratiques d'entretien des vergers sur la structuration des communautés de fourmis

La prise en compte des effets des pratiques sur des communautés d'arthropodes plus particulièrement sur des auxiliaires est relativement nouvelle dans les paysages agricoles fruitiers. Du point de vue de la conception des vergers et des pratiques d'entretien, les données recueillies nous ont permis d'évaluer les conséquences de la végétation cultivée (la diversité végétale, sa structure et son état) et de l'intensification agricole (utilisation de pesticides, fertilisation minérale et organique, irrigation) sur la diversité et la structure des communautés de fourmis. La richesse spécifique et la diversité (indice de Shannon) des fourmis diminuent avec la simplification du paysage agricole et avec l'augmentation de l'indice global d'intensification agricole (cf. article 3, chapitre 3).

Une analyse multivariée a permis d'évaluer l'impact de différentes pratiques et l'état de la végétation cultivée sur la structure des communautés de fourmis. Il est apparu que l'espèce *Monomorium salomonis* est fortement associée aux vergers dans lesquels la diversité végétale et la diversité variétale de manguiers sont très faibles et où les niveaux d'intensification sont plus élevés (usage de pesticides, fertilisation, irrigation). Ce résultat est expliqué par le fait que *M. salomonis* est une espèce anthropophile. *Palthotyreus tarsatus* est l'espèce qui est beaucoup plus associée aux vergers avec une richesse élevée en arbres fruitiers, une abondante litière et plus ombrageux. Ils correspondent aux vergers où les pratiques culturales sont absentes ou très faibles. Ces paramètres paysagers favorisent les fourmis Ponerinae comme *P. tarsatus* qui est une espèce de forêt ou de zone de transition savane-forêt et exerçant son activité de patrouille dans la litière.

Perspectives: L'inféodation d'une espèce particulière de fourmi à un milieu est un phénomène parmi les plus connus des milieux avec un niveau d'intensification agricole élevé. L'usage de pesticides est aussi cité comme élément très selectif dans la structuration des communautés de fourmis. Pour le cas de cette étude, l'association très marquée de *M. salomonis* avec les vergers de type 4 soulève des interrogations quant à l'écologie de l'espèce elle-même et ses relations avec d'autres arthropodes présents dans le même milieu. D'une manière générale, des espèces de fourmis anthropophiles ont été signalées comme vectrices des maladies virales ou fongiques vers des cultures fruitières (Kenne et al., 2003). Il serait important de vérifier si *M. salomonis* ne comporte pas de caractères aux effets néfastes pour les cultures dans les vergers; notamment quel serait son impact sur l'intégrité des arbres fruitiers ? Ne transmet-elle pas de maladies virales ou fongiques ou n'élève-t-elles pas d'insectes hémiptères ?

IV.4 La gestion agroécologique des vergers Sénégalais: une possibilité existe-t-elle avec les fourmis parmi les éléments fonctionnels ?

La gestion agroécologique du verger est une approche qui tend à intégrer différents éléments fonctionnels de l'agroécosystème dans le but d'augmenter ses capacités d'autorégulation. Cela appelle à une plus forte considération de la biodiversité des arthropodes qui résident dans le verger et à une meilleure compréhension du rôle joué par chaque espèce dans le verger et enfin la compréhension de leurs interactions respectives. La composante animale dans l'agroécosystème est connue pour être un élément déterminant pour la production végétale grâce à la pollinisation des fleurs mais aussi la lutte biologique effectuée par les ennemis naturels. En ce qui concerne les fourmis, leur contribution réelle au recyclage des nutriments minéraux, à la décomposition de la matière organique, à la structuration du sol et à la limitation du développement de maladies sur les plantes est un élément important. Il doit constituer un supplément quant à leur utilisation comme agents de lutte biologique contre les ravageurs dans les agroécosystèmes. Les programmes de lutte intégrée contre les ravageurs (IPM) avec les oecophylles apparaissent comme un outil pertinent, efficace, efficient et en adéquation avec une démarche agroécologique dans la mesure où ce sont les interactions trophiques entre composantes biologiques du milieu qui sont privilégiées aux dépens des interventions chimiques (Vayssières, 2012 ; Offenberg, 2015). La combinaison de la lutte biologique par les fourmis avec une méthode de gestion culturale dans les vergers est par exemple une démarche suggérée pour contrôler plusieurs ravageurs dans des plantations de cacaoyers, de manguiers, d'anacardiens ou de bananiers (Choate and Drummond, 2011). L'adoption effective d'une telle démarche reste cependant relativement faible dans la majorité des agroécosystèmes fruitiers en Afrique.

Les interactions entre les fourmis et les homoptères qu'elles entretiennent, les sécrétions d'acide formique donnant aux fruits un aspect moins attirant et les nuisances occasionnées durant la récolte des fruits constituent des problèmes très souvent cités comme des freins à l'adoption des fourmis comme agents de lutte biologique (Choate and Drummond, 2011). Selon Peng et Christian (2005), une manière efficace de se débarrasser du problème des homoptères peut être l'utilisation d'insecticides de basse toxicité et fortement sélectifs comme le potassium ou les huiles blanches qui sont capables de réduire les populations de ces insectes indésirables sans « impacter » sur les populations de fourmis. Il faut éviter à tout prix les organophosphates et les pyrethrinoides dans les vergers hébergeant des fourmis oecophylles (Van Mele and Cuc, 2007).

Certains critères doivent être pris en compte dans le choix d'une espèce de fourmi à adopter ou à favoriser comme agent lutte biologique dans les programmes de lutte intégrée (IPM). Tout d'abord, il est important d'identifier la faune des fourmis déjà présente dans l'agroécosystème parce qu'elle est souvent plus importante que celle couramment rencontrée dans le milieu concerné (Ward, 2010). La seconde étape, après l'identification d'une espèce en tant qu'agent de lutte biologique contre un ravageur, est d'étudier son écologie. La phénologie de l'espèce, sa durée de prédation aussi bien que ses relations avec d'autres ennemis naturels, avec les homoptères et les hémiptères ou avec l'homme constituent autant de facteurs susceptibles d'influencer l'habilité et la capacité de l'espèce de fourmi choisie à contrôler le ravageur ciblé (Choate and Drummond, 2011). Ces critères constituent autant d'éléments importants à prendre en compte pour l'adoption d'une espèce notamment dans les programmes de lutte intégrée contre les ravageurs (IPM).

Les rôles entre autres des fourmis en tant qu'agents structurant des sols, agents pollinisateurs ou agents contribuant à la conservation de la biodiversité sont encore assez faiblement pris en compte dans les études des fonctionnements des agroécosystèmes en Afrique de l'Ouest. Il existe dès lors un fort besoin de recherches pour mieux expliciter la contribution de certaines espèces de fourmis sur les processus du sol, leurs interactions avec les éléments de la pédofaune et leurs relations vis-à-vis de l'ensemble des chaînes trophiques, paramètres très importants dans le fonctionnement des agroécosystèmes tropicaux.

Finalement, les résultats de cette thèse ont permis de mettre en évidence des relations entre le fonctionnement des agroécosystèmes fruitiers, les communautés de fourmis et les mouches des fruits (*B. dorsalis* notamment). Cette étude est une première étape dans l'approche d'utilisation des fourmis comme agents de contrôle biologique et bio-indicateurs dans les agroécosystèmes africains en prouvant qu'elles peuvent être de très bons candidats. Il est cependant souhaitable de poursuivre dans une seconde étape, par l'étude des interrelations entre ennemis naturels, autres auxiliaires et bioagresseurs dans les agroécosystèmes d'une part et les liens pouvant exister entre la biodiversité des fourmis et la productivité fruitière d'autre part.

Références bibliographiques

-
- Abdulla N., Rwegasira G., Jensen K.-M., Mwatawala M. & Offenberg J. (2015).** Effect of supplementary feeding of *Oecophylla longinoda* on their abundance and predatory activities against cashew insect pests. *Biocontrol Science and technology* doi:10.1080/09583157.2015.1057476
- Adandonon A., Vayssières J.-F., Sinzogan A. & Van Mele P. (2009).** Density of pheromone sources of the weaver ant *Oecophylla longinoda* affects oviposition behaviour and damage by mango fruit flies (Diptera: Tephritidae). *Internal Journal of Pest Management* 55: 285-292.
- Agbogba C. (1985).** Observations sur la récolte de substances liquides et de sucs animaux chez deux espèces d'*Aphaenogaster* : *A. senilis* et *A. subterranea* (Hym. Formicidae). *Insectes Sociaux* 32: 427-434.
- Agbogba C. (1986).** Observations sur le nourrissage des larves chez deux espèces d'*Aphaenogaster* (Hymenoptera Formicidae). *Insectes Sociaux* 33: 217-220.
- Agbogba C. (1989).** Rôle de la reine dans le comportement des ouvrières immatures chez la fourmi *Aphaenogaster subterranea* (Latr.). *Insectes sociaux* 36: 156-160.
- Agbogba C. (1991).** Observations on the feeding-preparation signals of larvae in the ponerine ant *Pachycondyla cafferaria* (Smith). *Insectes Sociaux* 38: 439-442.
- Agbogba C. (1992).** Settlement in the prey termite nest by the ponerine ant *Pachycondyla cafferaria* (Smith), and tandem running signal analysis for the following ant. *Journal of Ethology* 10: 133-137.
- Agbogba C. & Howse P.E. (1992).** Division of labour between foraging workers of the ponerine ant *Pachycondyla cafferaria* (Smith) (Hymenoptera: Formicidae). *Insectes sociaux* 39: 455-458.
- Allou K., Doumbia M. & Diallo H.A. (2006).** Influence de trois facteurs sur le peuplement d'oecophylles dans la lutte biologique contre la punaise du cocotier en basse Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine* 18: 33-40.
- Alonso L.E. 2000.** Ants indicators of Diversity. In Agosti D, Majer JD, Alonso LE, Schultz TE (Eds.): Ants: Standard methods for measuring and monitoring biodiversity. *Smithsonian Institution Press, Washington, DC*, pp 80-88.
- Altieri M. (1999).** The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74: 19-31.
- Aluja M., Sivinski J., Rull J. & Hodgson P.J. (2005).** Behavior and predation of fruit fly larvae (*Anastrepha* spp.) (Diptera: Tephritidae) after exiting fruit in four types of habitats in tropical Veracruz, Mexico. *Environmental Entomology* 34: 1507-1516.
- Anato F., Wargui R., Sinzogan A., Offenberg J., Adandonon A., Kossou D. & Vayssières J.-F. (2015).** Reducing losses inflicted by insect pests on cashew, using weaver ants as efficient biological control agent. *Agricultural and Forest Entomology*, DOI: 10.1111/afe.12105; to be printed...
- Andersen A.N., Hoffmann B.D., Müller W. & Griffiths A.D. (2002).** Using ants as bioindicators in land management: simplifying assessment of ant community responses. *Journal of Applied Ecology* 39: 8-17.
- Andersen A.N., Fisher A., Hoffmann B.D., Read J.L. & Richards R. (2004).** Use of terrestrial invertebrates for biodiversity monitoring in Australian rangelands, with particular reference to ants. *Austral Ecology* 29: 87-92.

- Andersen A.N. & Majer J.D. (2004).** Ants show the way Down Under: invertebrates as bioindicators in land management. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2: 291-298.
- Andersson G.K.S. Birkhofer K., Rundlöf M. & Henrik G.S. (2013).** Landscape heterogeneity and farming practice alter the species composition and taxonomic breadth of pollinator communities. *Basic and Applied Ecology* 14: 540-546.
- André E. (1889).** Hyménoptères nouveaux appartenant au groupe des formicides. *Revue d'Entomologie* 8: 217-231.
- André E. (1890).** Matériaux pour servir à la faune myrmécologique de Sierra Leone (Afrique occidentale). *Revue d'Entomologie* 9: 311-327.
- ANSD (2014).** Bultin mensuel des statistiques économiques de décembre 2013. 109p.
- Appiah E.F., Ekesi S., Afreh-Nuamah K., Obeng-Ofori D. & Mohamed S.A. (2014).** African weaver ant-produced semiochemicals impact on foraging behavior and parasitism by the Opiine parasitoid, *Fopius arisanus* on *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae). *Biological Control* 79: 49-57.
- Armbrecht I. & Gallego M.C. (2007).** Testing ant predation on the coffee berry borer in shaded and sun coffee plantations in Colombia. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 124: 261-267.
- Assunção M.A., Torezan-Silingardi H.M. & Del-Claro K. (2014).** Do ant visitors to extrafloral nectaries of plants repel pollinators and cause an indirect cost of mutualism? *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 209: 244-249.
- Ativor I.N., Afreh-Nuamah K., Billah M.K. & Obeng-Ofori D. (2012).** Weaver Ant, *Oecophylla longinida* (Latreille) (Hymenoptera: Formicidae) Activity Reduces Fruit Fly Damage in Citrus Orchards. *Journal of Agriculture and Science Technology* A2: 449-458.
- Atlas du Sénégal (2000).** Les Editions J.A. Paris, pp 16-19.
- Avgin S.S & Luff M.L. (2010).** Ground Beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators of human impact. *Munis Entomology & Zoology*. 5: 209-215.
- Babin-Fenske J. & Anand M. (2010).** Soil insect communities and the restoration of an industrially-perturbed landscape: assessing success and surrogacy. *Restoration Ecology* 18:73-84
- Beattie A.J., Turnbull C., Knox R.B. & Williams E.G. (1984).** Ant inhibition of pollen function: a possible reason why ant pollination is rare. *American Journal of Botanic* 71: 421-426.
- Benckiser G. (2009).** Ants and sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 2: 15-26.
- Benton T.G., Vickery J.A. & Wilson J.D. (2003).** Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology and Evolution* 18: 182-188.
- Bequaert J. (1922).** Ants in their diverse relations to plant world. *Bulletin of the American Museum of Natural History* 45: 333-584.
- Bernadou A, Céréghino R, Barcet H, Combe M, Espadaler X. & Fourcassie V. (2013).** Physical and land-cover variables influence ant functional groups and species diversity along elevational gradients. *Landscape Ecology* 28: 1387-1400.
- Bestelmeyer B.T. & Schooley R.L. (1999).** The ants of the southern Sonoran desert: community structure and the role of trees. *Biodiversity Conservation* 8: 643-657.
- Bestelmeyer B. & Wiens J. (2001).** Ant biodiversity in semiarid landscape mosaics: The consequences of grazing vs. natural heterogeneity. *Ecological Applications* 11: 1123-1140.

- Bogart S.L. & Pruetz J.D. (2005).** Insectivory of savanna chimpanzees (*Pan troglodytes verus*) at Fongoli, Senegal. *American Journal of Physical Anthropology* 145: 11-20.
- Bolton B. (1980).** The ant tribe Tetramoriini (Hymenoptera: Formicidae). The genus *Tetramorium* Mayr in the Ethiopian zoogeographical region. *Bulletin of the British Museum (Natural History)*. *Entomology* 40: 193-384.
- Bolton B. (1982).** Afrotropical species of the Myrmicine ant genera *Cardiocondyla*, *Leptothorax*, *Melissotarsus*, *Messor* and *Cataulacus* (Formicidae). *Bulletin of the British Museum (Natural History)*. *Entomology* 45: 307-370.
- Bolton B. (1987).** A review of the *Solenopsis* genus-group and revision of Afrotropical *Monomorium* Mayr (Hymenoptera: Formicidae). *Bulletin of the British Museum (Natural History)*, *Entomology* 54: 263-452.
- Boulton A.M., Davies K.F. & Ward P.S. (2005).** Species richness, abundance, and composition of ground-dwelling ants in Northern California grasslands: role of plants, soil, and grazing. *Environmental Entomology* 34: 96-104.
- Blüthgen N. & Stork N.E. (2007).** Ant mosaics in a tropical rainforest in Australia and elsewhere: A critical review. *Austral Ecology* 32: 93-104.
- Blüthgen N. & Stork N.E. (2004).** Fiedler K., Bottom-up control and co-occurrence in complex communities: Honeydew and nectar determine a rainforest ant mosaic. *Oikos* 106: 344-358.
- Braet Y. (2004).** L'entomologie : un outil d'évaluation et de suivi des sites dans la perspective d'une gestion durable de la biodiversité. L'exemple des fourmis des litières du Parc National de Chaco (Argentine). Certificat en Gestion de l'Environnement. 124 p.
- Burel F., Lavigne C., Marshall E.J.P., Moonen A.C., Ouin A. & Poggio S.L. (2013).** Landscape ecology and biodiversity in agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 166: 1-2.
- Campos-Chaves J. (2011).** Ant colony tracking in the obligate army ant-following antbird *Phaenostictus mcleannani*. *Journal of Ornithology* 152: 497-504.
- Carroll C.R. & Jansen D.H. (1973).** Ecology of foraging by ants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 231-257.
- Carvalho K.S. & Vasconcelos H.L. (1999).** Forest fragmentation in central Amazonia and its effects on litter-dwelling ants. *Biological Conservation* 91: 151-157.
- Castracani C., Grasso D.A., Fanfani A. & Mori A. (2010).** The ant fauna of Castelporziano Presidential Reserve (Rome, Italy) as a model for the analysis of ant community structure in relation to environmental variation in Mediterranean ecosystems. *Journal of Insect Conservation* 14: 585-594.
- Casuala P. & Wilby A. (2006).** Thomas M.B., Understanding biodiversity effects on prey in multi-enemy systems. *Ecology Letters* 9: 995-1004.
- Cammeraat E.L.H. & Risch A.C. (2008).** The impact of ants on mineral soil properties and processes at different spatial scales. *Journal of Applied Entomology* 132: 285-294.
- Chailleux A., Bearez P., Pizzol J., Amiens-Desneux E., Ramirez-Romero R. & Desneux N. (2013a).** Potential for combined use of parasitoids and generalist predators for biological control of the key invasive tomato pest *Tuta absoluta*. *Journal of Pest Science* 86: 533-541.
- Chailleux A., Biondi A., Han P., Tabone E. & Desneux N. (2013b).** Suitability of the pest–plant system *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae)–tomato for *Trichogramma*

- (Hymenoptera: Trichogrammatidae) parasitoids and insights for biological control. *Journal of Economic Entomology* 106: 2310-2321.
- Chen Y-q., Li Q., Chen Y-l., Lu Z-X. & Zhou X-y. (2011).** Ant diversity and bio indicators in land management of lac insect agroecosystem in Southwestern China. *Biodiversity Conservation* 20: 3017-3038.
- Choate B. & Drummond F. (2011).** Ants as biological control agents in agricultural cropping systems. *Terrestrial Arthropod Reviews* 4: 157-180.
- Dag A. & Gazit S. (2000).** Mango pollinators in Israel. *Journal of Applied Horticulture. (Lucknow)*. 2: 39-43.
- Dahms H., Wellsten C., Wolters V. & Dauber J. (2005).** Effects of management practices on ant species richness and community composition in grasslands (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecol. News* 7 : 9-16.
- De la Mora A., Murnen C.J. & Philpott S.M. (2013).** Local and landscape drivers of biodiversity of four groups of ants in coffee landscapes. *Biodiversity Conservation* 22: 871-888.
- De Vega C. & Herrera C.M. (2013).** Microorganisms transported by ants induce changes in floral nectar composition of an ant-pollinated plant. *American Journal of Botany*. 100: 792-800.
- Decaëns T., Galvis J.H. & Amézquita E. (2001).** Propriétés des structures produites par les ingénieurs écologiques à la surface du sol d'une savane colombienne. *Compte Rendus Académie des Sciences de Paris* 324 : 465-478.
- Dejean A., Solano P.J., Ayroles J., Corbara B. & Orivel J. (2005).** Arboreal ants build traps to capture prey. *Nature* 434: 973. DOI: 10.1038/434973a.
- Dejean A., Djieto-Lordon C. & Orivel J. (2008).** The plant-ant *Tetraponera aethiops* (Pseudomyrmecinae) protects its host myrmecophyte *Barteria fistulosa* (Passifloraceae) through aggressiveness and predation. *Biological Journal of the Linnean Society* 93: 63-69.
- Dejean A., Grangier J, Leroy C. & Orivel J. (2009).** Predation and aggressiveness in host plant protection: a generalization using ants of the genus *Azteca*. *Naturwissenschaften* 96: 57-63.
- Dejean A., Leroy C., Corbara B., Roux O., Céréghino R., Orivel J. & Boulay R. (2010).** Arboreal Ants Use the “Velcro Principle” to Capture Very Large Prey. *PLoS ONE* 5: e11331.
- Dejean A., Corbara B., Orivel J. & Leponce M. (2007).** Rainforest canopy ants: The Implication of territoriality and predatory behaviour. *Functional Ecosystems and Communities* 1: 105-120.
- Dejean A. (2011).** Prey capture behavior in an arboreal African ponerine ant. *PLoS One* 6: e19837.
- Djieto-Lordon C. & Dejean A. (1999).** Tropical arboreal ant mosaics: innate attraction and imprinting determine nest site selection in dominant ants. *Behavioral Ecological Sociobiology* 45: 219-225.
- Dejean A. (1991).** Adaptation d'*Oecophylla longinoda* [Formicidae-Formicinae] aux variations spacio-temporelles de la densité de proies. *Entomophaga* 36: 29-54.
- Desneux N., Decourtye A. & Delpuech J.M. (2007).** The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology* 52: 81-106.
- Devine G.J. & Furlong M.J. (2007).** Insecticide use: Contexts and ecological consequences. *Agriculture and Human Values* 24: 281-306.

- Dias N.D.S., Zanetti R., Santos M.S., Gomes M.F., Peñaflor V., Broglio S.M.F. & Delabie J.H.C. (2012).** The impact of coffee and pasture agriculture on predatory and omnivorous leaf-litter ants. *Journal of Insect Science* 13: 1-11.
- Diatta P., Rey J.-Y., Vayssières J.-F., Diarra K., Coly E. V., Lechaudel M., Grechi I., Ndiaye S. & Ndiaye O. (2013).** Fruit phenology of citrus, mangoes and papayas influences egg-laying preferences of *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae). *Fruits* 68: 507-516.
- Dorn R.I. (2014).** Ants as a powerful biotic agent of olivine and plagioclase dissolution. *Geology* doi:10.1130/G35825.1.
- Drew R.A.I., Tsuruta K. & White I.M. 2005.** A new species of pest fruit fly (Diptera: Tephritidae: Dacinae) from Sri Lanka and Africa. *African Entomology* 13: 149-154.
- Dwomoh E.A., Afun J.V.K., Acknor J.B. & Agene V.N. (2009).** Investigations on *Oecophylla longinida* (Latreille) (Hymenoptera: Formicidae) as biocontrol agents in the protection of cashew plantations. *Pest Management Science* 65: 41-46.
- Ellison A.M., Farnsworth E.J. & Gotelli N.J. (2002).** Ant diversity in pitcher-plant bogs of Massachusetts. *Northeastern Naturalists* 9: 267-284.
- Emery C. (1892).** Voyage de M. Ch. Alluaud dans le territoire d'Assinie (Afrique occidentale) en juillet et août 1886. Formicides. *Annales de la Société Entomologique de France* 60: 553-574.
- EPPO A1 (VERSION 2013-09):** List of pests recommended for regulation as quarantine pests <http://www.eppo.int/QUARANTINE/listA1.htm>.
- Eubanks M.D. (2001).** Estimates of the direct and indirect effects of red imported fire ants on biological control in field crops. *Biological Control* 21: 35-43.
- FAO/WHO. (1998).** A Report of the FAO/WHO Joint Meeting of Pesticide Residues (JMPR), Chapter 7 Estimating Dietary Intake of Pesticide Residue, 7.4 Acute Reference Dose Rome 21-30 September 1998, p 130 . www.fao.org/docrep/012/i1216e/i1216e07.pdf
- FAO/WHO. (2000).** Pesticide Residues in Food: Report of the JMPR, FAO Plant Production and Protection Paper, FAO Geneva.
- Fagan K.C., Pywell R.F., Bullock J.M. & Marrs R.H. (2010).** Are Ants Useful Indicators of Restoration Success in Temperate Grasslands? *Restoration Ecology* 18:373-379.
- Floren A., Biun A. & Linsenmair K.E. (2002).** Arboreal ants as key predators in tropical lowland rainforest trees. *Oecologia*. 131: 137-144.
- Folgarait P.J. (1998).** Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: a review. *Biodiversity Conservation* 7: 1221-1244.
- Forel A. (1879).** Etudes myrmécologiques en 1879 (deuxième partie [1re partie en 1878]). *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* 16: 53-128.
- Forel A. (1901).** Formiciden des Naturhistorischen Museums zu Hamburg. Neue *Calyptomyrmex*-, *Dacryon*-, *Podomyrma*-, und *Echinopla*-Arten. *Jahrb. Hamburg. Wiss. Anstalten* 18: 45-82.
- Forel A. (1909).** Fourmis du Musée de Bruxelles. Fourmis de Benguela récoltées par M. Creighton Wellman, et fourmis du Congo récoltées par MM. Luja, Kohl et Laurent. *Annales de la Société Entomologique de Belgique* 53: 51-73.
- Forel A. (1910).** Note sur quelques fourmis d'Afrique. *Annales de la Société Entomologique de Belgique* 54: 421-458.

- Freitas B.M, Paxton & R.J. (1996).** The role of wind and insects in cashew (*Anacardium occidentale*) pollination in NE Brazil. *Journal of Agricultural Science* 126: 319-326.
- Frouz J. & Jilková V. (2008).** The effect of ants on soil properties and processes (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News* 11: 191-199.
- Garcia M.B., Antor R.J. & Espadaler X. (1995).** Ant pollination of the palaeoendemic dioecious *Borderea pyrenaica* (Dioscoreaceae). *Plant Systematics and Evolution* 198: 17-27.
- Gibb H. & Hochuli D.F. (2003).** Colonisation by a dominant ant facilitated by anthropogenic disturbance: effects on ant assemblage composition, biomass and resource use. *Oikos* 103: 469-478.
- Gillon D., Adam F. & Hubert B. (1984).** Production et consommation de graines en milieu sahelo-soudanien au Senegal: les fourmis, *Messor galla*. *Insectes sociaux* 31: 51-73.
- Goergen G., Vayssières J.-F., Gnanvossou D. & Tindo M. (2011).** *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae), a New Invasive Fruit Fly Pest for the Afrotropical Region: Host Plant Range and Distribution in West and Central Africa. *Environmental Entomology* 40: 844-854.
- Gollan J.R., de Bruyn L., Reid N., Smith D. & Wilkie L. (2011).** Can ants be used as ecological indicators of restoration progress in dynamic environments? A case study in a revegetated riparian zone. *Ecological Indicators* 11: 1517-1525.
- González F.G., Santamaría L., Corlett R.T. & Rodríguez-Gironés M.A. (2013).** Flowers attract weaver ants that deter less effective pollinators. *Journal of Ecology* 101: 78-85.
- Gotelli N.J. & Ellison A.M. (2002).** Biogeography at a regional scale: Determinants of ant species density in New England bogs and forests. *Ecology* 83: 1604-1609.
- Giller K.E., Witter E., Corbeels M. & Tittonell P. (2009).** Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: the heretics' view. *Field Crops Research* 114: 23-34.
- Grechi I., Sane C.A.B., Diame L., De Bon H., Benneveau A., Michels T., Huguenin V., Malezieux E., Diarra K. & Rey J.-Y. (2013).** Mango-based orchards in Senegal: diversity of design and management patterns. *Fruits* 68: 1-20.
- Hernández-Ruiz P. & Castaño-Meneses G. (2006).** Ants (Hymenoptera: Formicidae) diversity in agricultural ecosystems at Mezquitil Valley, Hidalgo, Mexico. *European Journal of Soil Biology* 42: S208-S212.
- Herrera C.M. (1987).** Components of pollinator "quality": comparative analysis of a diverse assemblage. *Oikos* 50: 79-90.
- Herrera C.M. (1989).** Pollinator abundance, morphology, and flowers visitation rate: analysis of the "quantity" component in a plant pollinator system. *Oecologia* 80: 241-248.
- Hill J.G., Summerville K.S. & Brown R.L. (2008).** Habitat associations of ant species (Hymenoptera: Formicidae) in a heterogeneous Mississippi landscape. *Environmental Entomology* 37: 453-463.
- Hoffmann B.D. & Andersen A.N. (2003).** Responses of ants to disturbance in Australia with particular reference to functional groups. *Austral Ecology* 28: 444-464.
- Hölldobler B. (1983).** Territorial Behavior in the Green Tree Ant (*Oecophylla smaragdina*). *Biotropica*. 15: 241-250.
- Hölldobler B. (1977).** Wilson E.O., Weaver ants. *Scientific American* 237: 146-154.

- Hölldobler B. (1978).** Wilson E.O., The multiple recruitment of the African weaver ant *Oecophylla longinida* (Latreille) (Hymenoptera: Formicidae). *Behavioral Ecological Sociobiology* 3: 19-60.
- Hölldobler B. & Wilson E.O. (1990).** The ants. Belknap. Cambridge, Massachusetts, USA.
- Hooper D.U. & Vitousek P.M. (1997).** The effects of plant composition and diversity on ecosystem processes. *Science* 277: 1302-1305.
- Hooper D.U., Chapin III F.S., Ewel J.J. Hector A., Inchausti P., Lavorel S., Lawton J.H., Lodge D.M., Loreau M., Naeem S., Schmid B., Setälä H., Symstad A.J., Vandermeer J. & Wardle D.A. (2005).** Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monograph* 75: 3-35.
- House A.P.N., Burwell C.J., Brown S.D. & Walters B.J. (2012).** Agricultural matrix provides modest habitat value for ants on mixed farms in eastern Australia. *Journal of Insect Conservation* 16: 1-12.
- Hsu J.C., Feng H.T. (2006).** Development of Resistance to Spinosad in Oriental Fruit Fly (Diptera: Tephritidae) in Laboratory Selection and Cross- Resistance. *Journal of Economic Entomology* 99: 931-936.
- Huang H.T. & Yang P. (1987).** The ancient cultured *Citrus* ant. A tropical ant used to control insect pests in Southern China. *BioScience* 37: 665-671.
- Husson F., Josse J., Le S. & Mazet J. (2011).** FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining with R. <http://factominer.free.fr>.
- Infoconseil (1999).** « Aperçu de la filière fruits au Sénégal », rapport rédigé pour les projets Infoconseil et PAOA, mai 1999, GRET, Dakar, 10 p.
- Infoconseil (2006).** « État des lieux de la filière fruits et légumes au Sénégal », rapport rédigé pour les projets Infoconseil et PAOA, avril 2006, GRET, Dakar, 70 p.
- James D.G., Stevens M.M., O'Malley K.J. & Faulder R.J. (1999).** Ant foraging reduces the abundance of beneficial and incidental arthropods in citrus canopies. *Biological Control* 14: 121-126.
- Janssen A., Montserrat M., HilleRisLambers R., de Roos A.M., Pallini A. & Sabelis M.W. (2006).** Intraguild predation usually does not disrupt biological control, in: Trophic and Guild in Biological Interactions Control. *Springer Netherlands*. pp. 21-44.
- Jennings N. & Pocock M.J.O. (2009).** Relationships between sensitivity to agricultural intensification and ecological traits of insectivorous mammals and arthropods. *Conservation Biology* 23: 1195-1203.
- Jing T., Zeng L., Lin Y., Lu Y. & Liang G. (2011).** Insecticide resistance of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae), in mainland China. *Pest Management Sciences* 67: 370-376.
- Jones C.G., Lawton J.H. & Shachak M. (1994).** Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* 69: 373-386.
- Jouquet P., Dauber J., Lagerlöf J., Lavelle P. & Lepage M. (2006).** Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology* 32: 153-164.
- Kakani E. G. & Mathiopoulos K. D. (2008).** Organophosphosphate resistance-related mutations in the acetylcholinesterase gene of Tephritidae. *Journal of Applied Entomology* 132: 762-771.

- Kaspari M. & Majer J.D. (2000).** Using Ants to monitor Environnement Change. In D Agosti, JD Majer, LE Alonso & TR Schultz (Ed) Standard Methods for measuring and monitoring Biodiversity. Smithsonian Institution Press. pp 89-98
- Kaspari M., Ward S.P. & Yuan M. (2004).** Energy gradients and the geographic distribution of local ant diversity. *Oecologia* 140: 407-413.
- Keller L. & Gordon E. (2006).** La vie des fourmis. *Odile Jacob*. pp 152-160.
- Kenne M., Schatz, B., Durand J.-L. & Dejean A. (2000).** Hunting strategy of a generalist ant species proposed as a biological control agent against termites. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 94: 31-40.
- Kenne M., Mony R., Tindo M., Njaleu L.C.K., Orivel J. & Dejean A. (2005).** The predatory behaviour of a tramp ant species in its native range. *Comptes Rendus Biologies*. 328: 1025-1030.
- Kenne M., Djéto-Lordon C., Orivel J., Mony R., Fabre A. & Dejean A. (2003).** Influence of insecticide treatments on ant-hemiptera associations in tropical plantations. *Journal of Economic Entomology* 96: 251-258.
- King J.R., Andersen A.N. & Cutter A.D. (1998).** Ants as bioindicators of habitat disturbance: validation of the functional group model for Australia's humid tropics. *Biodiversity and Conservation* 7: 1627-1638.
- Kone M., Konate S., Yeo K., Kouassi P.K. & Linsenmair K.E. (2014).** Effects of management intensity on ant diversity in cocoa plantation (Oumé, centre west Côte d'Ivoire). *Journal of Insect Conservation* 18: 701-712.
- Kumar D & Mishra A. (2008).** Ant community variation in urban and agricultural ecosystems in Vadodara District (Gujarat State), western India. *Asian Myrmecology* 2: 85-93.
- Kwon T.-S., Lee C.M. & Sung J.H. (2014).** Diversity decrease of ant (Formicidae, Hymenoptera) after a forest disturbance: different responses among functional guilds. *Zoological Studies* 53:1-11.
- Lach L., Parr C.L. & Abbott K.L. (2010).** Synthesis and Perspectives. In Lach L, Parr CL, Abbott KL (Eds): Ant Ecology. *Oxford University Press*. pp 305-310.
- Landis D.A., Menalled F.D., Costamagna A.C. & Wilkinson T.K. (2005).** Manipulating plant resources to enhance beneficial arthropods in agricultural landscapes. *Weed Science* 53: 902-908.
- Lane D.R. & BassiriRad H. (2005).** Diminishing effects of ant mounds on soil heterogeneity across a chronosequence of prairie restoration sites. *Pedobiologia* 49: 359-366.
- Lange D., Fernandes W.D., Raizer J. & Faccenda O. (2008).** Predacious activity of ants (Hymenoptera: Formicidae) in conventional and in no-till agriculture systems. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 51: 1199-1207.
- Langellotto, G.A. & Denno R.F. (2004).** Responses of invertebrate natural enemies to complex-structured habitats: a meta-analytical synthesis. *Oecologia* 139: 1-10.
- Latreille P.A. (1802) (part).** *Histoire Naturelle des Fourmis*, et recueil de mémoires et d'observations sur les abeilles, les araignées, les facucheurs, et autres insectes. 445 pp. Paris.
- Lavelle P. (1997).** Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecological Research* 27: 93-132.

- Leal I.R., Filgueiras B.K.C., Gomes J.P., Iannuzzi L. & Andersen A.N. (2012).** Effects of habitat fragmentation on ant richness and functional composition in Brazilian Atlantic forest. *Biodiversity Conservation* 21:1687-1701.
- Ledoux A. (1949).** Etude du comportement et de la biologie de la fourmi fileuse (*Oecophylla longinoda* Latr.). Thèse Université Paris, Annales des Sciences naturelles. *Zoologie* 2: 313-461.
- Leston D. (1973).** The ant mosaic – tropical tree crops and the limiting of pest and diseases. *Pest Articles and News Summaries* 19: 311-341.
- Letourneau D.K. (1998).** Ants, stem-borers, and fungal pathogens: experimental tests of a fitness advantage in *piper* ant-plants. *Ecology* 79: 593-603.
- Levan, K.E., Lou-Keng H.J., Mccann K.R., Ludka J.T. & Holway D.A. (2014).** Floral visitation by the Argentine ant reduces pollinator visitation and seed set in the coast barrel cactus, *Ferocactus viridescens*. *Oecologia* 174: 163-171.
- Levings S.C. (1983).** Seasonal, annual, and among-site variation in the ground ant community of a deciduous tropical forest: some causes of patchy species distributions. *Ecological Monograph* 53: 435-455.
- Lim G.T. (2007).** Enhancing the weaver ant, *Oecophylla smaragdina* (Hymenoptera: Formicidae), for biological control of a shoot borer, *Hypsipyla robusta* (Lepidoptera: Pyralidae), in Malaysian mahogany plantations. Thèse en Entomologie, Université de Virginie. pp139.
- Lux S.A., Copeland R.S., White I.M., Manrakhan A. & Billah M. (2003).** A new invasive fruit fly species from the *Bactrocera dorsalis* (Hendel) group detected in East Africa. *Insect Science and its Application* 23: 355-361.
- Maelfait J-P & Hendrickx F. (1998).** Spiders as bio-indicators of anthropogenic stress in natural and semi-natural habitats in Flanders (Belgium): some recent developments. In: Selden PA (ed) Proceedings of the 17th European Colloquium of Arach-nology. Dorset Press, Dorchester pp 293-300.
- Majer J.D. (1972).** The ant mosaic in Ghana cocoa farms. *Bultin of Entomological Restoration* 62: 151-160.
- Majer J.D. (1976).** The maintenance of the ant mosaic in Ghana cocoa farms. *Journal of Applied Ecology* 13: 123-144.
- Majer J.D. (1983).** Ant: Bio-indicators of minesite rehabilitation, land-use, and conservation. *Environmental Management* 7: 375-383.
- Majer J. D. & Nichols O. G. (1998).** Long-term recolonization patterns of ants in Western Australian rehabilitated bauxite mines with reference to their use as indicators of restoration success. *Journal of Applied Ecology* 35: 161-182.
- Majer J.D., Orabi G. & Bisevac L. (2007).** Ants (Hymenoptera: Formicidae) pass the bioindicator scorcard. *Myrmecological News*. 10: 69-76.
- Majer J.D., Orabi G. & Bisevac L. (2007).** Ants and sustainable agriculture. A review. *Myrmecological News*. 10, 69-76.
- Manrakhan A., Hattingh V., Venter J.-H. & M. Holtzhausen. (2011).** Eradication of *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae) in Limpopo Province, South Africa. *African Entomology* 19: 650-659.

- Margosian M.L., Garrett, K.A., Hutchinson, J. M.S. & With K.A. (2009).** Connectivity of the American Agricultural Landscape: Assessing the National Risk of Crop Pest and Disease Spread. *BioScience* 59:141-151.
- Matson P. A., Parton W.J., Power A.G. & Swift M.J. (1997).** Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* 277: 504-509.
- Mayr G. (1862).** Myrmecologische Studien. *Verhandlungen der k.k. Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Wien*, 12: 649-776.
- Mayr G. (1895).** Afrikanische Formiciden. *Annalen des k.k. Naturhistorischen Hofmuseums Wien* 10: 124-154.
- McGrew W.C., Pruetz J.D. & Fulton S.J. (2005).** Chimpanzees use tools to harvest social insects at Fongoli, Senegal. *Folia Primatologica* 76: 222-226.
- Menozi C. (1922).** Miscellanea mirmecologica. *Annali del Museo Civico di Storia Naturale di Genova* 9: 347-358.
- Murnen C.J., Gonthier D.J. & Philpott S.M. (2013).** Food webs in the litter: effects of food and nest addition on ant communities in Coffee agroecosystems and forest. *Environmental Entomology* 42: 668-676.
- Mwatawala M.W., White I.M., Maerere A.P., Senkendo F.J. & De Meyer M. (2004).** A new invasive *Bactrocera* species (Diptera Tephritidae) in Tanzania. *African Entomology* 12: 154-156.
- Ndiaye O., Vayssieres J.-F, Rey J.-Y, Ndiaye S., Diedhio, P.M., Ba C.T. & Diatta P. (2012).** Seasonality and range of fruit fly (Diptera: Tephritidae) host plants in orchards in Niayes and the Thiès Plateau (Senegal). *Fruits* 67: 311-331.
- New T.R. (2000).** How useful are ant assemblages for monitoring habitat disturbance on grasslands in south eastern Australia? *Journal of Insect Conservation* 4: 153-159.
- Öberg S. (2009).** Influence of landscape structure and farming practice on body condition and fecundity of wolf spiders. *Basic and Applied Ecology* 10: 614-621.
- Offenberg J., Nielsen M.G., Macintosh D.J, Havanon S. & Aksornkoae S. (2004).** Evidence that insect herbivores are deterred by ant pheromones. *Proceedings of the Royal Society of London Series B, Biological Science* 271: 433-435.
- Offenberg J. & Wiwatwitaya D. (2010).** Sustainable weaver ant (*Oecophylla smaragdina*) farming: harvest yields and effects on worker ant density. *Asian Myrmecology* 3: 55-62.
- Offenberg J. (2015).** Ants as tool in sustainable agriculture. *Journal of Applied Ecology*, doi: 10.1111/1365-2664.12496.
- Offenberg J. (2014).** Pest repelling properties of ant pheromones. *IOBC-WPRS Bulletin* 99: 173-176.
- Offenberg J. (2007).** The distribution of weaver ant pheromones on host trees. *Insectes Sociaux* 54: 248-250.
- Ohm J.R. & Miller T.E.X. (2014).** Balancing anti-herbivore benefits and anti-pollinator costs of defensive mutualists. *Ecology* 95: 2924-2935.
- Oksanen J., Blanchet F.G., Kindt R., Legendre P., Minchin P.R., O'Hara R.B., Simpson G.L., Solymos P., Stevens M.H.H. & Wagner H. (2011).** Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.0-2. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Oliver I. & Beattie A.J. (1996).** Invertebrates morphospecies as surrogates for species: A case study. *Conservation biology*. 10: 99-019.

- Olotu M.I., Du Plessis H., Seguni Z.S.K. & Maniania N.K. (2013).** Efficacy of the African weaver ant *Oecophylla longinida* (Hymenoptera: Formicidae) in the control of *Helopeltis* spp. (Hemiptera: Miridae) and *Pseudotheraptus wayi* (Hemiptera: Coreidae) in cashew crop in Tanzania. *Pest Management Science* 69: 911-918.
- Östman Ö., Ekbom B. & Bengtsson J. (2001).** Landscape heterogeneity and farming practice influence biological control. *Basic and Applied Ecology* 2: 365-371.
- Ottonetti L., Tucci L. & Santini G. (2006).** Recolonization patterns of ants in a rehabilitated lignite mine in central Italy: potential for the use of Mediterranean ants as indicators of restoration processes. *Restoration Ecology* 14: 60-66.
- Ouagoussounon I., Sinzogan A., Offenberg J., Adandonon A., Vayssières J.-F. & Kossou D. (2013).** Pupae transplantation to boost early colony growth in the weaver ant *Oecophylla longinoda* Latreille (Hymenoptera: Formicidae). *Sociobiology* 60: 374-379
- Ouagoussounon I., Offenberg J., Sinzogan A., Adandonon A., Kossou D. & Vayssières J.-F. (2015).** Founding weaver ant queens increase production and nanitic worker size. *Springer Plus*, doi: 10.1186/2193-1801-4-6
- Pacheco R. & Vasconcelos H.L. (2012).** Habitat diversity enhances ant diversity in a naturally heterogeneous Brazilian landscape. *Biodiversity Conservation* 21: 797-809.
- Passera L. & Aron S. (2005).** Les fourmis: Comportement, organisation sociale et évolution. *Les Press scientifiques du CNRC, Ottawa, Canada*. 441+ pp.
- Peakall R., Beattie J.A. & James S.H. (1987)** Pseudocopulation of an orchid by male ants: a test of two hypotheses accounting for the rarity of ant pollination. *Oecologia* 73: 522-524.
- Peck S.L., Mcquaid B. & Campbell C.L. (1998).** Using ant species (Hymenoptera: Formicidae) as a biological indicator of agroecosystem condition. *Environmental Entomology* 27: 1102-1110.
- Peng R. & Christian K. (2004).** The weaver ant, *Oecophylla smaragdina* (Hymenoptera Formicidae), an effective biological control agent of the red-banded thrips, *Selenothrips rubrocinctus* (Thysanoptera: thripidae) in mango crop in the Northern Territory of Australia. *International Journal of Pest Management* 50: 107-114.
- Peng R. & Christian K. (2013).** Do weaver ants affect arthropod diversity and the natural-enemy-to-pest ratio in horticultural systems? *Journal of Applied Entomology* 137 711-720.
- Peng R. & Christian K. (2010).** Ants as biological-control agents in the horticultural industry, in: *Ant Ecology*, Lach L, Parr CL, Abbott KL (Eds.), Oxford University Press, pp 123-124..
- Peng R. & Christian K. (2005).** Integrated pest management in mango orchards in the Northern Territory Australia, using the weaver ant, *Oecophylla smaragdina*, (Hymenoptera: Formicidae) as a key element. *International Journal of Pest Management* 51: 149-155.
- Peng R. & Christian K. (2007).** The effect of the weaver ant, *Oecophylla smaragdina* (Hymenoptera: Formicidae), on the mango seed weevil, *Sternonchetus mangiferae* (Coleoptera: Curculionidae), in mango orchards in the Northern Territory of Australia. *International Journal of Pest Management* 53: 15-24.
- Perfecto I. & Snelling R. (1995).** Biodiversity and the transformation of a tropical agroecosystem: ants in coffee plantation. *Ecology Applications* 5, 1084-1097.
- Perfecto I. & Vandermeer J. (1996).** Microclimatic changes and the indirect loss of ant diversity in a tropical agroecosystems. *Oecologia* 108: 577-582.

- Perfecto I. & Armbrrecht I. (2003).** The coffee agroecosystem in the Neotropics: combining ecological and economic goals. In: Vandermeer J.H. (Eds.), *Tropical agroecosystems*. CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C. pp 159-194.
- Perfecto I. & Castiñeiras A. (1998).** Deployment of the predaceous ants and their conservation in agroecosystems, in: Barbosa P. (Eds), *Conservation Biological Control*, Academic Press, Washington, DC, pp 269-289.
- Petal J. (1971).** The effect of mineral fertilization on ant populations in meadows. *Polish Ecological Studies* 2: 209-218.
- Philpott S.M, Uno S. & Maldonado J. (2006).** The importance of ants and high-shade management to coffee pollination and fruit weight in Chiapas, Mexico. *Biodiversity Conservation* 15: 487-501.
- Philpott S.M., Perfecto I. & Vandermeer J. (2008).** Behavioral Diversity of Predatory Arboreal Ants in Coffee Agroecosystems. *Environmental Entomology* 37: 181-191.
- Philpott S.M. & Armbrrecht I. (2006).** Biodiversity in tropical agroforests and the ecological role of ants and ant diversity in predatory function. *Ecological Entomology* 31 369-377.
- Pierre E.M. & Idris A.H. (2013).** Studies on the predatory activities of *Oecophylla smaragdina* (Hymenoptera: Formicidae) on *Pteroma pendula* (Lepidoptera: Psychidae) in oil palm plantations in Teluk Intan, Perak (Malaysia). *Asian Myrmecology* 5: 163-176.
- Piñero J.C., Mau R.F.L. & Vargas R.I. (2009).** Managing Oriental Fruit Fly (Diptera: Tephritidae), with Spinosad-Based Protein Bait Sprays and Sanitation in Papaya Orchards in Hawaii. *Journal of Economic Entomology*, 102: 1123-1132.
- R:** A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Rainio J. & Niemelä J. (2003).** Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators. *Biodiversity and Conservation* 12: 487-506.
- Redford K.H. (1987).** Ants and Termites as food. Patterns of Mammalian Myrmecophagy, in: *Current Mammalogy*, Genoways HH (Eds), University of Nebraska State Museum. pp. 349-399.
- Regupathy A. & Ayyasamy R. (2011).** Ants in biofuel, *Jatropha* ecosystem: pollination and phoresy. *Hexapoda* 18: 168-175.
- Retana J. & Cerdá X. (2000).** Patterns of diversity and composition of Mediterranean ground ant communities tracking spatial and temporal variability in the thermal environment. *Oecologia* 123: 436-444.
- Rey J.-Y. & Dia M.L. (2010).** Mangues: des vergers villageois aux nouvelles plantations d'exportation, In : Durteurtre, G., Faye, M.D. & Dieye, P.N. (Ed.) *L'agriculture sénégalaise à l'épreuve des marchés*, ISRA-Karthala, Dakar, Sénégal, 257-279.
- Reyes-Lopez R., Ruiz R. & Fernández-Haeger J. (2003).** Community structure of ground-ants: the role of single trees in a Mediterranean pastureland. *Acta Oecologia* 24, 195-202.
- Ribas C.R., Schoereder J.H., Pic M. & Soares S.M. (2003).** Tree heterogeneity, resource availability, and larger scale processes regulating arboreal ant species richness. *Austral Ecology* 28: 305-314.
- Ribas C.R. & Schoereder J.H. (2007).** Ant communities, environmental characteristics and their implications for conservation in the Brazilian Pantanal. *Biodiversity Conservation* 16: 1511-1520.

- Ribas C.R., Solar R.R.C., Campos R.B.F., Schmidt F.A., Valentim C.L. & Schoereder J.H. (2011a).** Can ants be used as indicators of environmental impacts caused by arsenic? *Journal of Insect Conservation*. 16: 413-421.
- Ribas C.R., Schmidt F.A., Solar R.R.C., Campos R.B.F., Clarisse L.V. & Schoereder J.H. (2011b).** Ants as indicators of the success of rehabilitation efforts in deposits of gold mining tailings. *Restoration Ecology* 1-9. DOI: 10.1111/j.1526-100X.2011.00831.x).
- Ríos-Casanova L., Valiente-Banuet A. & Rico-Gray V. (2006).** Ant diversity and its relationship with vegetation and soil factors in an alluvial fan of the Tehuacán Valley, Mexico. *Acta Oecologica* 29: 316-323.
- Rising W.S. (1981).** Prey Preferences in the Desert Horned Lizard: Influence of Prey Foraging Method and Aggressive Behavior. *Ecology* 62: 1031-1040.
- Rizali A., Clough Y., Buchori D., Hosang M.L.A., Bos M.M. & Tschardt T. (2013).** Long-term change of ant community structure in cacao agroforestry landscapes in Indonesia. *Insect Conservation Diversity* 6: 328-338.
- Rwomushana I., Ekesi S., Gordon I. & Ogol C.K.P.O. (2008).** Host Plants and Host Plant Preference Studies for *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae) in Kenya, a New Invasive Fruit Fly Species in Africa. *Annual Entomological Society of America* 101: 331-340.
- Roger J. (1862).** Synonymische Bemerkungen. *Berl. Entomol. Z.* 6: 283-297.
- Rodger J.G., Balkwill K. & Gemmill B. (2004).** African pollination studies: where are the gaps? *International Journal of Tropical Insect Science* 24: 5-28.
- Rodríguez-Girones M.A., González F.G., Llandres A.L., Corlett R.T. & Santamaría L. (2013).** Possible role of weaver ants, *Oecophylla smaragdina*, in shaping plant–pollinator interactions in South-East Asia. *Journal of Ecology* 101 1000-1006.
- Rosado J.L.O., Gonçalves de Gonçalves M., Dröse W., Ely e Silva E.J., Krüger R.F. & Loeck A.E. (2013).** Effect of climatic variables and vine crops on the epigeic ants fauna (Hymenoptera: Formicidae) in the Campanha region, state of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Insect Conservation*. 17, 1113-1123.
- San Jose M., Leblanc L., Geib S.M. & Rubinoff D. (2013).** An evaluation of the species status of *Bactrocera invadens* and the systematics of the *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) Complex. *Annals of the Entomological Society of America*. 106: 684-694.
- Sanford M.T. (2010).** Pollination of citrus by honey bees. *University of Florida IFAS extension*.
- Santschi F. (1910).** Nouveaux dorylines africains. *Revue Suisse de Zoologie* 18: 737-759.
- Santschi F. (1912).** Fourmis d'Afrique et de Madagascar. *Annales de la Société Entomologique de Belgique* 56: 150-167.
- Santschi F. (1913).** Glanure de fourmis africaines. *Annales de la Société Entomologique de Belgique* 57: 302-314.
- Santschi F. (1914).** Formicides de l'Afrique occidentale et australe du voyage de Mr. le Professeur F. Silvestri. *Bollettino del Laboratorio di Zoologia generale e agraria della R. Scuola superiore d'Agricoltura in Portici* 8: 309-385.
- Santschi F. (1919).** Fourmis nouvelles Ethiopiennes. *Revue Zoologique Africaine* 6: 229-240.
- Santschi F. (1920a).** Formicides africains et américains nouveaux. *Annales de la Société Entomologique de France* 88: 361-390.

- Santschi F. (1920b).** Cinq nouvelles notes sur les fourmis. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* 53: 163-186.
- Santschi F. (1921).** Quelques nouveaux formicides africains. *Annales de la Société Entomologique de Belgique* 61: 113-122.
- Santschi F. (1923).** Descriptions de nouveaux formicides Ethiopiens et notes diverses. 1. *Revue Zoologique Africaine* 11: 259-295.
- Santschi F. (1926).** Description de nouveaux formicides Ethiopiens (3me. partie). *Revue Zoologique Africaine* 13: 207-267.
- Santschi F. (1929).** Etude sur les *Cataglyphis*. *Revue Suisse de Zoologie* 33: 597-618.
- Santschi F. (1939).** Resultats scientifiques des croisières du Navire-École Belge "Mercator." 2. Formicidae. *Bulletin du Musée Royal d'Histoire Naturelle de Belgique* 15: 159-167.
- Schatz B., Proffit M., Rakhi B.V., Borges R.M. & Hossaert-McKey M. (2006).** Complex interactions on fig trees: ants capturing parasitic wasps as possible indirect mutualists of the fig-fig wasp interaction. *Oikos*. 113 344-352.
- Schultz R.T. & McGlynn T.P. (2000).** The interactions of ants with others organisms, in: Agosti D., Majer J.D., Alonso L.E., Schultz T.E. (Eds.), *Ants: Standard methods for measuring and monitoring biodiversity*. *Smithsonian Institution Press, Washington, DC*, pp 35-44.
- Schutze M.K., Aketarawong, N., Amornsak, W., et al. (2014a).** Synonymization of key pest species within the *Bactrocera dorsalis* species complex (Diptera: Tephritidae): taxonomic changes based on a review of 20 years of integrative morphological, molecular, cytogenetic, behavioural and chemoecological data. *Systematic Entomology* DOI: 10.1111/syen.12113.
- Schutze M.K., Mahmood K., Pavasovic A., et al. (2014b).** One and the same: integrative taxonomic evidence that *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae) is the same species as the Oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis*. *Systematic Entomology* DOI: 10.1111/syen.12114.
- Seguni Z.S.K., Way M.J. & Van Mele P. (2011).** The effect of ground vegetation management on competition between the ants *Oecophylla longinoda* and *Pheidole megacephala* and implications for conservation biological control. *Crop Protection* 30: 713-717.
- Seidler T.G. & Plotkin J.B. (2006).** Seed dispersal and spatial pattern in tropical trees. *PLOS Biology* 4: e344. DOI: 10.1371/journal.pbio.0040344.
- Simon S., Bouvier J.-C., Debras J.-F. & Sauphanor B. (2010).** Biodiversity and pest management in orchard systems. A review. *Agronomy Sustainable Development* 30: 139-152.
- Sinzogan A.A.C., Van Mele P. & Vayssières J.-F. (2008).** Implications of on-farm research for local knowledge related to fruit flies and the weaver ant *Oecophylla longinoda* in mango production. *International Journal Pest Management* 54: 241-246.
- Sommaggio D & Burgio G. (2014).** The use of Syrphidae as functional bioindicators to compare vineyards with different managements. *Bulletin of Insectology* 67: 147-156.
- Sporleder M. & Rapp G. (1998).** The effect of *Oecophylla longinoda* (Latr.) (Hym., Formicidae) on coconut palm productivity with respect to *Pseudotheraptus wayi* Brown (Hem., Coreidae) damage in Zanzibar. *Journal of Applied Entomology* 122: 475-481.
- Symondson W.O.C, Sunderland K.D. & Greenstone M.H. (2002).** Can generalist predators be effective biocontrol agents? *Annual Review of Entomology* 47: 561-594.

- Tadu Z., Djiéto-Lordon C., Yede, Youbi E.M., Aléné C.D., Fomena A. & Babin R. (2014).** Ant mosaics in cocoa agroforestry systems of Southern Cameroon: influence of shade on the occurrence and spatial distribution of dominant ants. *Agroforestry Systems* DOI 10.1007/s10457-014-9676-7.
- Ternoy J., Poulanc C., Diop M. & Nugawela P. (2006).** La chaîne de valeurs mangue au Sénégal: analyse et cadre stratégique d'initiatives pour la croissance de la filière, Unité BDS du programme USAID Croissance économique, Dakar, Sénégal, Sept., 90 p.
- Torchote P., Sitthicharoenchai D. & Chaisuekul C. (2010).** Ant Species Diversity and Community Composition in Three Different Habitats: Mixed Deciduous Forest, Teak Plantation and Fruit Orchard. *Tropical Natural History* 10: 37-51.
- Thomsen M., Faber J.H. & Sorensen P.B. (2012).** Soil ecosystem health and services – Evaluation of ecological indicators susceptible to chemical stressors. *Ecological Indicators* 16: 67–75.
- Tilman D., Knops J., Wedin D., Reich P., Ritchie M. & Siemann E. (1997).** The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science* 277: 1300-1302.
- Torchote P., Sitthicharoenchai D. & Chaisuekul C. (2010).** Ant species diversity and community composition in three different habitats: mixed deciduous forest, teak plantation and fruit orchard. *Tropical Natural History* 10 : 37-51.
- Touré F. S. & Fall A.S. (2001).** Cités horticoles en sursis ? L'agriculture urbaine dans les grandes Niayes au Sénégal. *CRDI, Ottawa, Canada*, 120 pp.
- Tsuji K., Hasyim A., Harlion & Nakamura K. (2004).** Asian weaver ants, *Oecophylla smaragdina*, and their repelling of pollinators. *Ecological Research* 19 669-673.
- Underwood E.C. & Fisher B.L. (2006).** The role of ants in conservation monitoring: If, when, and how. *Biological Conservation* 132: 166-182.
- Urrutia-Escobar M.X. & Armbrrecht I. (2013).** Effect of Two agroecological management strategies on ant (Hymenoptera: Formicidae) diversity on coffee plantations in southwestern Colombia. *Environmental Entomology* 42: 194-203.
- Vanderplank F.L. (1960).** The bionomics and ecology of the red ant tree, *Oecophylla* sp., and its relationship to the coconut bug *Pseudotheraptus wayi* Brown (Coreidae). *Journal of Animal Ecology* 29: 15-33.
- Van Hamburg H. & Guest P. J. (1997).** The Impact of Insecticides on Beneficial Arthropods in Cotton Agro-Ecosystems in South Africa. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 32: 63-68.
- Van Mele P. & Cuc N.T.T. (2007).** Ant as friend. Improving your tree cops with weaver ants. *CAB International* pp 69.
- Van Mele P. & Cuc N.T.T. (2000).** Evolution and status of *Oecophylla smaragdina* (Fabricius) as a pest control agent in citrus in the Mekong Delta, Vietnam. *International Journal of Pest Management* 46: 295-301.
- Van Mele P. & Van Chen H. (2004).** Farmers, Biodiversity and Plant Protection: Developing a Learning Environment for Sustainable Tree cropping Systems. *International Journal of Agriculture Sustainability* 2: 67-76.
- Van Mele P., Vayssières J.-F., Tellingén E.V. & Vrolijk J. (2007).** Effect of an African weaver ant, *Oecophylla longinoda*, in controlling Mango Fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Benin. *Journal of Economic Entomology* 100: 695-701.

- Van Mele P., Vayssières J.-F., Adandonon A. & Sinzogan A. (2009).** Ant cues affect the oviposition behaviour of fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Africa. *Physiological Entomology* 34: 256-261.
- Van Mele P. & Vayssières J.-F. (2007a).** West' Mango Farmers Have Allies in the Trees. *Biocontrol News and Information* 28: 56-57.
- Van Mele P. & Vayssières J.-F. (2007b).** Weaver ants help farmers to capture organic markets. *Pesticides News* 75: 9-11.
- Van Mele P. & Chien H.V. (2011).** Farmers, Biodiversity and Plant Protection: developing a learning environment for sustainable tree cropping systems. *International Journal of Agriculture Sustainability*. 2: 67-76.
- Van Wijngaarden P.M., van Kessel M. & van Huis A. (2007).** *Oecophylla longinoda* (Hymenoptera: Formicidae) as a biological control agent for cocoa capsids (Hemiptera: Miridae), *Proceeding Netherland Entomological Society Meeting* 18: 21-31.
- Vandermeer J., Perfecto I. & Philpott S. (2010).** Ecological complexity and pest control in organic coffee production: uncovering an autonomous ecosystem service. *BioScience* 60, 527-537.
- Vannière H., Didier C., Rey J.-Y., Diallo T.M., Kéita S. & Sangaré M. (2004).** La mangue en Afrique de l'Ouest francophone : les systèmes de production et les itinéraires techniques. *Fruits*. 59: 383-398.
- Vayssières J.-F. (2004).** Rapport de mission sur l'essai piégeage de Tephritidae du manguier au Sénégal. Consultation pour l'Union Européenne (Bruxelles), CIRAD Flhor – UNION EUROPEENNE, 15 p. + 6 p. d'annexes.
- Vayssières J.-F., Goergen G, Lokossou O, Dossa P. & Akponon C. (2005).** A new *Bactrocera* species detected in Benin among mango fruit flies (Diptera Tephritidae) species. *Fruits*, 60: 371-377.
- Vayssières J.-F., Lokossou O., Ayegnon D. & Akponon C. (2006).** Inventaire, fluctuations des populations et importance des dégâts des espèces de mouches des fruits inféodées au manguier dans le département du Borgou (Bénin) en 2005-2006. *Proc. Actes Atelier Sciences Naturelles*, 1, 27-34.
- Vayssières J.-F., Korie S. & Ayegnon D. (2009).** Correlation of fruit fly (Diptera Tephritidae) infestation of major mango cultivars in Borgou (Benin) with abiotic and biotic factors and assessment of damage. *Crop Protection* 28: 477-488.
- Vayssières J.-F., Sinzogan A.A.C., Adandonon A., Ouagoussounon I. & Noma Z. (2010).** Les fourmis tisserandes sont bénéfiques aux producteurs de mangues béninois. *Lettre d'information du COLEACP sur la lutte régionale contre les mouches des fruits et légumes en Afrique de l'Ouest* 7: 2-3.
- Vayssières J.-F., Sinzogan, A.A.C., Korie, S., Adandonon, A. & Worou, S. (2011).** Field observational studies on circadian activity pattern of *Oecophylla longinoda* (Latreille) (Hymenoptera: Formicidae) in relation to abiotic factors and mango cultivars. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 5: 790-802.
- Vayssières J.-F., Sinzogan A., Adandonon A., Van Mele P. & Korie S. (2013).** Ovipositional behaviour of two mango fruit fly species (Diptera: Tephritidae) in relation to *Oecophylla* cues (Hymenoptera: Formicidae) as compared to natural conditions without ant cues. *International Journal of Biological and Chemical Science* 7: 447-456.

- Vayssières J.-F. (2012).** Inter-relations entre les différents niveaux trophiques concernant les Tephritidae vis-à-vis des cultures horticoles en zone tropicale. *Université Paris Est, France*, HDR, 158p.
- Vayssières J.-F., Sinzogan A., Adandonon A., Van Mele P. & Korie S. (2013).** Ovipositional behavior of two mango fruit fly species in relation to *Oecophylla* cues as compared to natural conditions without ant cues. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 7: 447-456.
- Vayssières J.-F., Ouagoussounon I., Adandonon A., Sinzogan A., Korie S., Todjihoundé R., Alassane S., Wargui R., Anato F. & Goergen G. (2015).** Seasonal pattern in food gathering of the weaver ant *Oecophylla longinoda* (Hymenoptera: Formicidae) in mango orchards in Benin. *Biocontrol Science and Technology*, doi: 10.1080/09583157.2015.1048425.
- Vergheze A., Sreedevi K. & Nagaraju D.K. (2006).** Pre and post harvest IPM for the mango fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Proceedings of the 7th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance 10-15 September 2006*, Salvador, Brazil pp. 179-182.
- Wagner D., Brown M.J.F. & Gordon D.M. (1997).** Harvester ant nests, soil biota and soil chemistry. *Oecologia*. 112: 232-236.
- Ward S.P. (2000).** Broad-Scale Patterns of Diversity in Leaf Litter Ant Communities. In Agosti D, Majer JD, Alonso LE, Schultz TE (Eds.): *Ants: Standard methods for measuring and monitoring biodiversity*. *Smithsonian Institution Press, Washington, DC*, pp 99-121.
- Ward S.P. (2010).** Taxonomy, Phylogenetics and Evolution. In, *Ant Ecology*. Lach L, Parr CL, Abbott KL. (Eds). *Oxford University Press*. New York, New York, U.S.A. pp. 1-17.
- Wardle D.A., Yeates G.W., Bonnera K.I., Nicholson K.S. & Watson R.N. (2001).** Impacts of ground vegetation management strategies in a kiwifruit orchard on the composition and functioning of the soil biota. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 893-905.
- Wargui R., Offenberg J., Sinzogan A., Adandonon A., Kossou D. & Vayssières J.-F. (2015).** Comparing different methods to assess weaver ant abundance in plantation trees. *Asian Myrmecology* 7: 1-12.
- Warren II R.J. & Bradford M.A. (2011).** Ant colonization and coarse woody debris decomposition in temperate forests. *Insectes Sociaux*. DOI 10.1007/s00040-011-0208-4.
- Way M.J. (1954).** Studies of the life history and ecology of the ant *Oecophylla longinoda* (Latreille). *Bulletin of the Entomological Research* 45: 93-112.
- Way M.J. & Khoo K.C. (1992).** Role of ants in pest management. *Annual Review of Entomology* 37 479-503.
- Weber N.A. (1972).** The Attines: The fungus-culturing ants. *American Scientists* 60: 448-456.
- Wheeler W.M. (1922).** Ants of the American Museum Congo Expedition. A contribution to the myrmecology of Africa. *Bulletin of the American Museum of Natural History* 45: 1-1139.
- Weibull A-C. & Östman Ö. (2003).** Species composition in agroecosystems: The effect of landscape, habitat, and farm management. *Basic Applied Ecology* 4: 349-361.
- Willmer P. & Stone G. (1997).** Temperature and water in desert bees. *Journal of Thermal Biology* 22: 453-465.
- Whitford W.G. & Bryant M.B. (1979).** Behavior of a Predator and its Prey: The Horned Lizard (*Phrynosoma cornutum*) and Harvester Ants (*Pogonomyrmex* spp.). *Ecology* 60: 686-694.

- Whitney H.M., Dyer A., Chittka L., Rands S.A. & Glover B.J. (2008).** The interaction of temperature and sucrose concentration on foraging preferences in bumblebees. *Naturwissenschaften* 95: 845-50.
- Wiescher P.T., Pearce-Duvet J.M.C. & Feener D.H. (2012).** Assembling an ant community: species functional traits reflect environmental filtering. *Oecologia* 169: 1063-1074.
- Wojtusiak J., Godzińska E.J. & Dejean A. (1995).** Capture and retrieval of very large prey by workers of the African weaver ant, *Oecophylla longinoda* (Latreille 1802). *Tropical Zoology* 8: 309-318. DOI:10.1080/03946975.1995.10539287.
- Yeo K., Konate S., Tiho S. & Camara S.K. (2011).** Impacts of land use types on ant communities in a tropical forest margin (Oumé–Côte d’Ivoire). *African Journal of Agricultural Research*. 6: 260-274.
- Yusuf A.A., Gordon I., Crewe R.M. & Pirk C.W.W. (2013).** An Effective Method for Maintaining the African Termite-Raiding Ant *Pachycondyla analis* in the Laboratory. *African Entomology* 21:132-136.
- Yusuf A.A., Gordon I., Crewe R.M. & Pirk C.W.W. (2014).** Prey choice and raiding behaviour of the Ponerine ant *Pachycondyla analis* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Natural History* 48: 345-358.

ANNEXES

ANNEXE 1: Article publié dans *Fruits*, 2013, vol. 68, 1-20: Mango-based orchards in Senegal: diversity of design and management patterns Réf: *Fruits* 68(6): 446-466 (2013)

Original article

Mango-based orchards in Senegal: diversity of design and management patterns

Isabelle GRECH^{1,*}, Cheikh Amet Bassirou SANE^{2,3}, Lamire DIAM^{2,3}, Hubert DE BON¹, Aurore BENNEVEAU¹, Thierry MICHEL⁴, Virginie HUGUENIN¹, Eric MALEZIEUX¹, Karamoko DIARRA⁵, Jean-Yves REY^{1,5}

¹ Cent. Coop. Intern. Rech. Agron. Dev. (CIRAD), Persyst, UPR HortSys, TAB-103 / PS4, 34398 Montpellier Cedex 5, France, grech@cirad.fr

² Inst. Sénégalais Rech. Agric. (ISRA), Cent. Dev. Hortico., BP 3120 Dakar, Senegal

³ Univ. Cheikh Anta Diop (UCAD), Fac. Sci. Tech., BP 5005 Dakar, Senegal

⁴ Cent. Coop. Intern. Rech. Agron. Dev. (CIRAD), Persyst, UPR HortSys, F-97410 Saint-Pierre, La Réunion, France

⁵ Inst. Sénégalais Rech. Agric. (ISRA), Cent. Dev. Hortico., BP 484 Thiès, Senegal

Mango-based orchards in Senegal: diversity of design and management patterns.

Abstract—Introduction. Mango-based orchards in Senegal occur in a large diversity of cropping systems, but few typologies of these systems exist and none are associated with their comprehensive and quantitative analysis. In this study we defined and characterized the typology of these systems based on a quantitative assessment of their planting design, management, vegetative state, hedgerow structure and infestation by a major pest of mango, the *Bactrocera invadens* fly. **Materials and methods.** Multivariate analysis and clustering methods were applied to data from 64 mango-based orchards and their surrounding hedgerows sampled in the Dakar and Thiès regions, in Senegal. **Results and discussion.** Four types of cropping systems were identified according to orchard design and management patterns: (1) 'No-input mango diversified orchards', (2) 'Low-input mango orchards', (3) 'Medium-input citrus-predominant orchards' and (4) 'Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards'. Orchard characteristics varied among these patterns. For instance, vegetation was dense and homogeneous in system 1, and the mortality rate of trees was high in system 2 but low in system 3. Orchards of systems 3 and 4 were mostly associated with hedgerows with, respectively, boundary-marking and defensive species. Lastly, the number of *B. invadens* flies was high in orchards of system 4, whereas it was low in those of system 2. **Conclusion.** The diversity of mango-based cropping systems in Senegal is now well described and quantified. This characterization is a preliminary step that is essential for further studies aiming to improve these systems.

Senegal / *Mangifera indica* / fruit trees / orchards / typology / design / crop management / *Bactrocera invadens* / hedges / multivariate analysis

Vergers à base de manguiers au Sénégal: diversité des modèles de conception et de gestion.

Résumé—Introduction. Les vergers à base de manguiers au Sénégal se rencontrent sous une grande diversité de systèmes de culture. Cependant, peu de typologies de ces systèmes existent et aucunes ne sont associées à leur analyse exhaustive et quantitative. Dans cette étude, nous avons défini et caractérisé la typologie de ces systèmes sur la base d'une évaluation quantitative de leur conception, de leur gestion, de leur état végétatif, de la structure de leurs haies et de leur infestation par un ravageur important de la mangue, la mouche *Bactrocera invadens*. **Matériel et méthodes.** Des méthodes d'analyse multivariée et de classification ont été appliquées sur des données provenant de 64 vergers à base de manguiers et de leurs haies environnantes, échantillonnés dans les régions de Dakar et de Thiès, au Sénégal. **Résultats et discussion.** Quatre types de systèmes de culture ont été identifiés selon des modèles de conception et de gestion du verger :

* Correspondence and reprints

ANNEXE 2: Article publié par *African Entomology*, 2015, vol 23 (2), 294-305:
Influence of *Oecophylla longinoda* Latreille, 1802 (Hymenoptera: Formicidae) on mango infestation by *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) in relation to Senegalese orchard design and management practices

Influence of *Oecophylla longinoda* Latreille, 1802 (Hymenoptera: Formicidae) on mango infestation by *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) in relation to Senegalese orchard design and management practices

L. Diamé^{2,4,*}, I. Grechi⁵, J-Y. Rey^{1,2}, C.A.B. Sané^{2,4}, P. Diatta^{2,4}, J-F. Vayssières^{1,3},
A. Yasmine^{2,4}, H. De Bon¹ & K. Diarra⁴

¹CIRAD; UPR HortSys; Montpellier, France

²ISRA/CDH, BP 3120, Dakar, Senegal

³IITA, Cotonou, Benin

⁴Université Cheikh Anta Diop, BP 5005 Dakar, Senegal

⁵CIRAD, UPR HortSys, F-97410 Saint-Pierre, La Réunion, France

Damage caused by the fruit fly *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (syn. *B. invadens* Drew, Tsuruta & White) (Diptera: Tephritidae) on mangoes in Senegal leads to export market production losses. A potential biological control agent against this pest is the weaver ant *Oecophylla longinoda* Latreille (Hymenoptera: Formicidae). Senegalese mango-based orchards present a diversity in design and management practices that can influence the abundance of these two species in orchards. In this study we evaluated i) the ability of the *O. longinoda* ant to limit *B. dorsalis* damage in Senegalese orchards, and ii) variations in population abundance for these two species depending on orchard design and management practices. The study was conducted in Senegal in the Niayes area and the Thiès plateau. Fifteen orchards were sampled among three out of four kinds of orchards identified in this area: (1) 'No-input mango diversified orchards', (3) 'Medium-input citrus-predominant orchards' and (4) 'Medium-input large mango- or citrus-predominant orchards'. In one of the orchards we measured infestation rates and numbers of fly pupae that developed from mangoes collected from trees (cv. Kent) 'with' and 'without' *O. longinoda* colonies over three harvesting



ANNEXE 3: Article publié par *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, vol. 212, 94–105: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.004>: Relations between the design and management of Senegalese orchards and ant diversity and community composition

Agriculture, Ecosystems and Environment 212 (2015) 94–105

Contents lists available at ScienceDirect

Agriculture, Ecosystems and Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/agee

Relations between the design and management of Senegalese orchards and ant diversity and community composition

Lamine Diame^{a,b,*}, Rumsaïs Blatrix^c, Isabelle Grechi^d, Jean-Yves Rey^{a,e}, Cheikh Amet Bassirou Sane^{a,b}, Jean-François Vayssières^{c,f}, Hubert de Bon^e, Karamoko Diarra^b

^a ISRAKCOH, BP 3120 Dakar, Senegal
^b UCAD, BP 7925 Dakar, Senegal
^c CEFE UMR 5175, CNRS, Université de Montpellier, Université Paul Valéry Montpellier, EPHE, 1919 route de Mende, 34293 Montpellier Cedex 5, France
^d CIRAD, UPR HortSys, F-97410 Saint-Pierre, La Réunion, France
^e CIRAD, UPR HortSys, F-34293 Montpellier Cedex 5, France
^f ITTA, 08 BP 0932 Cotonou, Benin

ARTICLE INFO

Article history:
Received 26 January 2015
Received in revised form 29 June 2015
Accepted 4 July 2015
Available online xxx

Keywords:
Ants
Formicidae
Bioindicators
Sahelian agroecosystem
Mango and citrus-based orchards

ABSTRACT

Although agriculture is a major factor in environmental change, the level of its impact is likely to vary with farming practices. Thus, we sought to determine how farming practices might affect the natural compartment of agroecosystems and the sustainable use of land. In particular, we examined ant biodiversity and community composition as related to orchard design and management practices in the mango- and citrus-based orchard agroecosystems of Senegal. Ants were collected using pitfall traps in 49 orchards classed in four types based on their design and management. The results showed that the effect of practices was significant, albeit weak, and a typology of orchards based on design and management practices was congruent with a typology based on the composition of ant communities. The different types of orchard were seen to differ in the richness and diversity ant species. Moreover, ant richness and diversity was positively correlated with tree richness. We were also able to identify some ant species as being related to agricultural practices. For instance, *Monomorium salomonis* (L.) was closely

ANNEXE 4: Article soumis dans *Fruits*: Ants: biological control agents and major functional elements in fruit agro-ecosystems

ANNEXE 5 : Fiche de suivi d'abondance des fourmis oecophylles dans 15 vergers et pendant quatre mois (deux en saison sèche et deux en saison pluvieuse). Le suivi se faisait une fois tous les 15 jours

Date: Date de suivi du verger,

Site: Site où auquel appartient le verger,

Branches principales de l'arbre: branches ramifiées au tronc principal de l'arbre et branches ramifiées à ces mêmes branches. Elles sont situées à la hauteur de l'observateur ayant les bras dressés (branches situées à environ 2,40m),

N° verger: Numéro du verger,

N° arbre: Numéro de l'arbre suivi dans le verger,

Espèce végétale: Espèce fruitière de l'arbre.

Date											
Site											
N° verger											
		Branches principales de l'arbre									
N° arbre	Espèce végétale	1	2	3	4	5	7	8	9	10	...
1	Manguier										
2	Manguier										
3	Agrume										
4	...										
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

ANNEXE 6 : Fiche de suivi d'abondance des mouches des fruits (*Bactrocera dorsalis*) dans 15 vergers et pendant quatre mois (deux en saison sèche et deux en saison pluvieuse)

ME = Methyl eugenol, attractif alimentaire pour les mâles de *Bactrocera dorsalis*.

Site	N° verger	Attractif	Repetition	Date prélèvement précédent	Date prélèvement courant	Intervalle d'observations	Nbre <i>Bactrocera</i> mâle	Captures journalières. Calc.
		ME	1					
		ME	2					
		ME	3					
		ME	1					
		ME	2					
		ME	3					
		ME	1					
		ME	2					
		ME	3					
		ME	1					
						

ANNEXE 7 : Fiches de recueil de données sur les arbres fruitiers et sur les pratiques culturales du verger (groupes ‘orchard design’, ‘orchard vegetative state’ et ‘orchard management’)

verger: n° du verger suivi,

arbre: n° arbre suivi,

espèce: espèce de l'arbre,

variété: variété de l'arbre (pour manguier uniquement),

variétéDG: deuxième variété de l'arbre (pour manguier uniquement) dans le cas du double greffage,

distIR: distance inter-rang (m),

distSLR: distance sur le rang (m),

DensLocale: densité locale (Nb arbres/ha); $\text{densLoc} = 10^4 / (\text{distIR} * \text{distSLR})$;

hauteur: hauteur de l'arbre (m),

diamFronD: diamètre de frondaison de l'arbre (m),

vigueur: niveau de vigueur de l'arbre (de 0 à 5, par ordre de vigueur croissante),

litière: niveau d'abondance de la litière (de 0 = sol nu à 3 = sol entièrement recouvert de feuilles et/ou résidus de taille),

état: état de l'arbre (0 = mort, 1 = vivant).

Ces différentes variables mesurées sur les arbres fruitiers l’ont été sur un échantillon de 100 pieds dans chaque verger.

verger	arbre	espèce	variété	variétéDG	distIR	distSLR	DensLocal e	hauteur	diamFronD	vigueur	litière	état
	1											
	2											
	3											
	::											
	100											

ANNEXE 8 : Fiche d'enquêtes et tableau de recueil de données sur les pratiques culturales d'entretien des vergers

❖ FICHE D'ENQUETES SUR LES PRATIQUES CULTURALES D'ENTRETIEN

1- Est-ce que vous traitez ?

Oui ☐ Non ☐

2- Si oui, quelle culture traitez-vous ?

☐ Manguier ☐ Agrume ☐ Maraîchage Autre ☐

Si maraîchage, quelles cultures :

Si autres cultures, lesquelles ?

3- Quelle partie de la plante traitez-vous ?

☐ Manguier : ☐ Sol ☐ Tronc ☐ Feuillage : à quelle hauteur :

☐ Agrume : ☐ Sol ☐ Tronc ☐ Feuillage : à quelle hauteur :

☐ Maraîchage : si oui, quel pourcentage de couverture du sol du verger par le maraîchage :
.....

4- Quel produit utilisez-vous ?

☐ Manguier :

Produit ¹2 : Nom : Matière active :

Ravageur (s) ciblé (s) :

Nombre d'applications par an :

Fréquence : 1 fois / semaine ; 1 fois / deux semaines ; 1 fois / mois

Période : quel mois : Stade : floraison – 1ers fruits – récolte – végétation – flush

Dose/ traitement : Quantité de bouillie appliquée par arbre ou par
superficie :

Produit 2 : Nom : Matière active :

Ravageur (s) ciblé (s) :

Nombre d'applications par an :

² Un produit de traitement comprend: le nom commercial, la matière active (à voir sur l'étiquette de l'emballage), une dose d'utilisation (quantité de produit commercial à utiliser par surface ou par arbre), une quantité de bouillie par arbre ou par ha (la bouillie est composée du mélange du produit commercial avec de l'eau). La quantité de bouillie de référence est de 1000 l/ha pour un pulvérisateur à eau et 400 l/ha pour un atomiseur à moteur. 1 pulvérisateur à dos contient en général 20 litres de bouillie. Certains produits commerciaux sont utilisés directement comme le Furadan en granulé sans dilution dans l'eau.

Fréquence : 1 fois / semaine ; 1 fois / deux semaines ; 1 fois / mois

Période : quel (s) mois :..... Stade (s) : floraison – 1ers fruits – récolte – végétation – flush

Dose/application :..... Quantité de bouillie appliquée par arbre ou pas
superficie :

Produit 3 : Nom : Matière active :

Ravageur (s) ciblé (s) :

Nombre d'applications par an :

Fréquence : 1 fois / semaine ; 1 fois / deux semaines ; 1 fois / mois

Période : quel (s) mois :..... Stade (s) : floraison – 1ers fruits – récolte – végétation – flush

Dose/application :..... Quantité de bouillie appliquée par arbre ou par
superficie :

☐ Agrumes

Produit 1 : Nom : Matière active :

Ravageur (s) ciblé (s) :

Nombre d'applications par an :

Fréquence : 1 fois / semaine ; 1 fois / deux semaines ; 1 fois / mois

Période : quel (s) mois :..... Stade (s) : floraison – 1ers fruits – récolte – végétation – flush

Dose/application :..... Quantité de bouillie appliquée par arbre ou par
superficie :

Produit 2 : Nom : Matière active :

Ravageur (s) ciblé (s) :

Nombre d'applications par an :

Fréquence : 1 fois / semaine ; 1 fois / deux semaines ; 1 fois / mois

Période : quel (s) mois :..... Stade (s) : floraison – 1ers fruits – récolte – végétation – flush

Dose/ application :..... Quantité de bouillie appliquée par arbre ou par
superficie :

Produit 3 : Nom : Matière active :

Ravageur (s) ciblé (s) :

Nombre d'applications par an :

Fréquence : 1 fois / semaine ; 1 fois / deux semaines ; 1 fois / mois

Période : quel (s) mois :..... Stade (s) : floraison – 1ers fruits – récolte – végétation – flush

Dose/ application :..... Quantité de bouillie appliquée par arbre ou par
superficie :

☐ Cultures maraîchères :

Produit 1 : Nom : Matière active :

Culture (s)/Ravageur (s) ciblé (s) :

Nombre d'applications par culture :

Fréquence : 1 fois / semaine ; 1 fois / deux semaines ; 1 fois / mois

Période : quel (s) mois :..... Stade (s) : floraison – 1ers fruits – récolte – végétation – flush

Dose/application:..... Quantité de bouillie appliquée par arbre ou par
application :

Produit 2 : Nom : Matière active :

Culture (s)/Ravageur (s) ciblé (s) :

Nombre d'applications par culture :

Fréquence : 1 fois / semaine ; 1 fois / deux semaines ; 1 fois / mois

Période : quel (s) mois :..... Stade (s) : floraison – 1ers fruits – récolte – végétation – flush

Dose/application :..... Quantité de bouillie appliquée par arbre ou par
superficie :

Produit 3 : Nom : Matière active :

Culture (s)/Ravageur (s) ciblé (s) :

Nombre d'applications par culture:

Fréquence : 1 fois / semaine ; 1 fois / deux semaines ; 1 fois / mois

Période : quel (s) mois :..... Stade (s) : floraison – 1ers fruits – récolte – végétation – flush

Dose/application :..... Quantité de bouillie appliquée par arbre ou par traitement :
.....

☐ Autre(s) culture(s) – si traitement pesticides : espèce :..... (faire une fiche par espèce
cultivée)

Produit 1 : Nom : Matière active :

Culture (s)/Ravageur (s) ciblé (s):

Nombre d'applications par culture :

Fréquence : 1 fois / semaine ; 1 fois / deux semaines ; 1 fois / mois

Période : quel (s) mois : Stade (s) : floraison – 1ers fruits – récolte – végétation – flush

Dose/application : Quantité de bouillie appliquée par arbre ou par traitement :

TAILLE DES ARBRES

- 5- Est-ce que les arbres sont taillés ? Oui ☐ Non ☐
- 6- Fréquence : nombre de fois par an : 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ moins d'une fois par an ☐
- 7- Quand la taille est-elle pratiquée ?
Mois :
Stade de développement :
- 8- Objectif (s) de la taille :
- limiter la hauteur de l'arbre : ☐
- Limiter l'encombrement de l'arbre (éviter qu'il ne touche les autres arbres) : ☐
- Favoriser la lumière dans l'arbre (éclaircissage) ☐
- Couper les branches mortes et épiphytes : ☐

IRRIGATION

- 9- Est- ce que le verger est irrigué ? oui ☐ non ☐
- 10- Provenance de l'eau d'irrigation :
- 11- Comment est-il irrigué ? au tuyau ☐ à la raie ☐ par aspersion ☐
Au goutte-à-goutte ☐ autre :
- 12- Quantité d'eau apportée à chaque irrigation ?
ou durée si tuyau d'arrosage : Et/ou taille de la cuvette :
- 13- Quelle est la fréquence d'irrigation ? tous les jours ☐ 2 à 3 fois par semaine ☐
1 fois par semaine ☐ tous les 10 jours ☐ tous les 15 jours ☐ autre : ☐
- 14- A quelle période est faite l'irrigation ?
Toute l'année ☐ avant floraison ☐ début floraison ☐
début fructification ☐ maturation ☐ récolte ☐
- 15- pendant combien de temps est faite l'irrigation ?

FERTILISATION

- 16- Est- ce le verger est fertilisé ? oui ☐ non ☐
- 17- Quel est la nature du fertilisant ? Fumier ☐ 10 10 20 ☐ Urée ☐
Autre :
- 18- Provenance du fertilisant :

- Troupeau de
- Poulailier :
- Magasins de vente de produits agricoles :
- Autres :

19- Quelle quantité utilisez-vous pour fertiliser ?

- **Fumier** : Nombre de seau /Pied : Nombre de Brouettes/Pied :
Nombre de sacs/Pieds :
Poids d'un seau : Poids d'une brouette : Poids d'un sac :
- **Urée** : Nombre de kg /Pieds :
- **10 10 20** : Nombre de kg /Pieds :
- **Autre** : Nom : Nombre de kg /Pieds :

20- Quelle est la fréquence de fertilisation ? tous les mois ☐ 1 fois par an ☐

2 fois par an ☐ 3 fois par an ☐ 1 fois tous les 2 ans ☐ autre ☐

21- A quelle période est faite la fertilisation ?

Toute l'année ☐ avant floraison ☐ début floraison ☐

début fructification ☐ maturation ☐ après récolte ☐ autre ☐

ENTRETIEN DU VERGER

22- Le verger est-il entretenu ? Oui ☐ Non ☐

23- Si oui, quelle est le type d'entretien ? Mécanique ☐ Sanitaire ☐

Mécanique : Labour ☐ désherbage ☐ ramassage des feuilles ☐ Autres :

Fréquence : tous les mois ☐ tous les 2 mois ☐ tous les trimestres ☐ 1 fois par an ☐

2 fois par an ☐ 3 fois par an ☐ autre ☐

Sanitaire : Les fruits tombés sont-ils ramassés ? Oui ☐ Non ☐

Si oui, à quelle (s) période (s) a (ont) lieu le (s) ramassage (s) des fruits ? Premiers avortements ☐ avant la récolte ☐ pendant la récolte ☐ après la récolte ☐ avant et pendant la récolte ☐ pendant et après la récolte ☐ avant, pendant et après la récolte ☐ Autre ☐

Fréquence : une fois par semaine ☐ deux fois par semaine ☐ une fois par quinzaine ☐ une fois par mois ☐ une fois par campagne ☐ autre ☐

Que deviennent les fruits ramassés : mis dans un coin du verger ☐ enfuis dans un trou ☐
mis dans des sacs à plastique ☐ donnés au bétail ☐ autre ☐

❖ TABLEAU DE DONNEES SUR LES PRATIQUES CULTURALES D'ENTRETIEN DES VERGERS

verger: n° du verger suivi,

paturage: utilisation secondaire du verger pour le pâturage (0 = non, 1 = oui, occasionnelle, périphérique ou animaux isolés, 2 = oui, régulière ou troupeaux),

maraichage: utilisation secondaire du verger pour d'autres cultures (maraichères / vivrières) (0 = non, 1 = oui) ; irrigation: irrigation du verger (0 = aucune, 1 = arrosages partiels, réservés aux jeunes arbres ou agrumes peu fréquents dans le verger et/ou à des quantités faibles à modérées (≤ 200 l /arbre/sem), 2 = arrosages à des quantités modérées à fortes (> 200 l /arbre/sem) de la majorité des arbres du verger et/ou installation d'équipement d'irrigation (goutte-à-goutte, miro-aspersion),

entretSol: travail du sol et/ou desherbage sous les arbres (0 = non, 1 = oui),

pesticide: application de pesticides (naturels ou de synthèse) pour la protection des arbres fruitiers (0 = aucune, 1 = oui, 1 à 2 applications par an, 2 = oui, 3 à 5 applications par an, 3 = oui, plus de 5 applications par an),

fertilisation: fertilisation du verger (0 = pas d'apport de fumier ni d'engrais de synthèse, 1 = apports faibles ($< 0,500$ kg N/an/arbre) uniquement sous forme de fumier, 2 = apports faibles ($< 0,500$ kg N/an/arbre) sous forme de fumier et/ou d'engrais, 3 = apports satisfaisants ($\geq 0,500$ kg N/an/arbre) sous tout type de forme),

recSanitaire: fréquence des récoltes sanitaires (0 = non, 1 = oui, occasionnelles à régulières (≥ 1 /an), 2 = oui, fréquentes (≥ 1 /semaine),

pesticideF: application de pesticides (naturels ou de synthèse) pour la protection des arbres fruitiers contre les fourmis (cf code pesticide),

pesticideT: application de pesticides (naturels ou de synthèse) pour la protection des arbres fruitiers contre les termites (cf code pesticide),

pesticideM: application de pesticides (naturels ou de synthèse) pour la protection des arbres fruitiers contre les mouches (cf code pesticide),

taille: taille d'entretien des arbres fruitiers (0 = non, 1 = oui).

Ces différentes variables (Groupe 'orchard management') ont été mesurées pour chaque verger.

verger	paturage	maraichage	irrigation	entretSol	pesticide	fertilisation	recSanitaire	pesticideF	pesticideT	pesticideM	taille

....

ANNEXE 9 : Pourcentage de vergers dans lesquels chaque espèce de fourmi est présente. Pour les noms complets des espèces de fourmis, cf Tableau 7, chapitre 3

